

# Uppfångning och kvarhållning av $^{134}\text{Cs}$ och $^{85}\text{Sr}$ i olika växtutvecklingsstadier

*Interception and retention of  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{85}\text{Sr}$  at different growth stages*

Anna-Lisa Mårtensson



Examensarbete  
Civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik



SLU, Sveriges lantbruksuniversitet  
Fakulteten för naturresurser och lantbruksvetenskap  
Institutionen för mark och miljö

Anna-Lisa Mårtensson

Uppfångning och kvarhållning av  $^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$  i olika växtutvecklingsstadier  
Interception and retention of  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{85}\text{Sr}$  at different growth stages

Handledare: Joris van Schaik, institutionen för mark och miljö, SLU  
Biträdande handledare: Stefan Bengtsson, institutionen för mark och miljö, SLU  
Examinator: Allan Rodhe, institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet  
1TV960, Examensarbete, 30 hp, D-nivå, Teknik  
Civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik 270 hp

Institutionen för mark och miljö, SLU, Examensarbeten 2012:04  
Uppsala 2012

Nyckelord: cesium, kvarhållning, LAI, motåtgärder, strontium, radioaktivitet, raps, uppfångning, vall, vete, växtutvecklingsstadier

Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>

Omslag: Våraps våtdeponeras med Cs-134 och Sr-85, foto författaren.



## REFERAT

### Uppfångning och kvarhållning av $^{134}\text{Cs}$ och $^{85}\text{Sr}$ i olika växtutvecklingsstadier

*Anna-Lisa Mårtensson*

Utsläpp av radionuklider till atmosfären kan genom regn leda till att de våtdeponeras på växter. Radionukliderna kan då fångas upp av växterna och hållas kvar vilket kan resultera i förhöjda halter av radioaktivitet hos växterna. Om detta leder till att gränsvärden överskrids kan kassering av växter som används vid livsmedelsproduktion vara nödvändig. Motåtgärder kan vidtas för att undvika kontaminering eller minska halterna. För att veta vilka motåtgärder som ska användas är det viktigt att veta hur växtens biomassa, bladyteindex (LAI), utvecklingsstadium samt väderförhållanden påverkar uppfångningen och kvarhållningen.

I detta arbete undersöktes uppfångningen och kvarhållningen av  $^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$  hos vårvete, vall och vårraps. Inverkan av växtens biomassa, LAI och utvecklingsstadium samt nederbörd efter deponering undersöktes också. Arbetet genomfördes som ett fältförsök med försöksrutor med storleken 1 x 1 m. Växterna våtdeponerades med  $^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$  med hjälp av en regnsimulator. En total aktivitet på 40 kBq/m<sup>2</sup> för båda radionukliderna deponerades per försöksruta. Deponeringar skedde under fyra olika växtutvecklingsstadier och växtprover togs ungefär fyra timmar efter deponering samt ett och fem dygn senare. Aktiviteten hos de torkade växtproverna mättes med en High Purity Germanium (HPGe) detektor. Därefter beräknades uppfångningsfraktioner och kvarhållningsfaktorer.

Försöket visade att uppfångningsfraktionen var störst vid det tredje växtutvecklingsstadiet för både vete och raps; degmognad för vete och fröutveckling för raps. Vallen, som slogs av efter två deponeringar, uppvisade störst uppfångningsfraktion vid andra växtutvecklingsstadiet, blomning. Hos raps och vall verkade uppfångningsfraktionen för  $^{85}\text{Sr}$  vara något högre vid samtliga växtutvecklingsstadier. För biomassan och uppfångningsfraktionen fanns ett positivt samband, för LAI och uppfångningsfraktionen var sambandet inte signifikant. Kvarhållningen visade en svag trend att minska med tiden, minskningen var störst under det första dygnet efter uppfångningen. Dock var standardavvikelsen stor och värden därmed osäkra.

**Nyckelord:** cesium, kvarhållning, LAI, motåtgärder, strontium, radioaktivitet, raps, uppfångning, vall, vete, växtutvecklingsstadier

*Institutionen för Mark och miljö, Sveriges lantbruksuniversitet.  
Box 7014, SE-750 07 UPPSALA*

## ABSTRACT

### Interception and retention of $^{134}\text{Cs}$ and $^{85}\text{Sr}$ at different growth stages

*Anna-Lisa Mårtensson*

Emissions of radionuclides to the atmosphere can lead to wet deposition on plants in the event of rainfall. An increased level of radioactivity in the plants may occur due to interception and retention of the radionuclides. If the content of the plants is above the threshold limit value, entire yields may have to be destroyed. In order to prevent contamination or decrease the content countermeasures can be taken. The impact of the biomass, leaf area index (LAI) and growth stage of the plant on the interception and retention is important to know in order to decide which countermeasures to use. Weather may also be an important factor.

In this work the interception and retention of  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{85}\text{Sr}$  by spring wheat, ley and spring oil-seed rape was studied. The impact of the biomass, LAI and growth stage of the plant and precipitation after deposition was also studied. The work was conducted as a field study with plots of the size 1 x 1 m. The plants were wet deposited with  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{85}\text{Sr}$  by using a rain simulator. A total activity of 40 kBq/m<sup>2</sup> for both radionuclides was deposited on each plot. Depositions were performed during four different growth stages and the plants were sampled approximately four hours, one and five days after deposition. Activities of the dried plant samples were measured with a High Purity Germanium (HPGe) detector. Finally the interception fraction and the retention factor were calculated.

The study showed that the interception fraction was highest for the third growth stage for both wheat and oil-seed rape; dough ripeness for wheat and ripening for oil-seed rape. Ley, which was harvested after two depositions, had the highest interception fraction at the second growth stage, flowering. Oil-seed rape and ley seemed to have a slightly higher interception fraction for  $^{85}\text{Sr}$  at all growth stages. There was a positive relationship for the biomass and interception fraction, for the LAI and interception fraction the relationship wasn't significant. The retention showed a weak trend of decreasing with time, with the decrease being largest during the first day after the interception. However, the standard deviation was large and consequently the values uncertain.

**Keywords:** radiocaesium, countermeasures, growth stages, interception, LAI, ley, oil-seed rape, radioactivity, retention, radiostrontium, wheat

*Department of Soil and Environment, Swedish University of Agricultural Science.  
Box 7014, SE-750 07 UPPSALA*

## FÖRORD

Detta examensarbete omfattar 30 högskolepoäng och är den avslutande delen på civilingenjörsprogrammet i Miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet och Sveriges lantbruksuniversitet (SLU). Arbetet utfördes på Institutionen för mark och miljö, SLU, och är en sidostudie till doktorsavhandlingen "Importance of development and plant growth on interception of wet deposited radiocaesium and radiostrontium by spring oilseed rape and spring wheat" som Stefan Bengtsson arbetar med. Joris van Schaik var handledare och Stefan Bengtsson var biträdande handledare, båda tillhörande Institutionen för mark och miljö, SLU. Ämnesgranskare var Klas Rosén på Institutionen för mark och miljö, SLU.

Jag vill rikta ett stort tack till min handledare Joris van Schaik som alltid har funnits tillgänglig för att svara på frågor och hjälpa till att lösa problem och dessutom visat stort engagemang för arbetet och kommit med uppmuntrande ord. Tack även till Stefan Bengtsson för hjälp med deponering och frågor. Tack till Klas Rosén för granskning av arbetet och förslag på ändringar i rapporten. Jag vill även tacka familj och vänner för stöd och uppmuntran under arbetets gångs samt hjälp med korrekturläsning.

Uppsala, 2012

Anna-Lisa Mårtensson





## POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Radioaktivitet är ett ämnes egenskap att sönderfalla till ett annat, mer stabilt ämne. Vid sönderfallet avges joniserande strålning vilken består av partiklar eller fotoner med sådan energi att de kan slå ut elektroner från atomer eller molekyler som de kolliderar med. Alfa-, beta- och gammastrålning är exempel på några stråltyper. Radioaktiv strålning kan komma från rymden och marken, men även från artificiella källor. Fission, dvs. atomklyvning, används vid kärnkraft och är den viktigaste källan för artificiella radionuklider där de tre mest betydelsefulla fissionsprodukterna gällande radioekologi är  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{131}\text{I}$  och  $^{137}\text{Cs}$ , isotoper av strontium, jod och cesium. Artificiella radionuklider kan släppas ut i naturen genom normal drift av kärnkraftverk, förvar av kärnavfall, olyckor samt kärnvapentester. Om människan utsätts för tillräckligt höga doser radioaktiv strålning kan det leda till cancer eller ärftliga skador.

När kärnkraft används finns det alltid risk för att en olycka kan inträffa och vid omfattande olyckor kan radioaktiva ämnen släppas ut och stiga upp i atmosfären på grund av den höga temperaturen. Ämnena transporteras sedan med vinden och faller så småningom till marken genom torr- eller våtdeposition. Torrdeposition uppkommer då partiklar faller mot marken eller då plymen av partiklar berör växter och mark. Våtdeposition uppstår då nederbörd för de radioaktiva ämnena till marken. Det radioaktiva nedfallet kan sedan tas upp av växter, både genom bladen och via rötterna. Upptag via bladen är störst direkt efter nedfallet medan rotupptag har större betydelse något år efter olyckan. Växter kan ta upp olika mycket av det radioaktiva nedfallet beroende på hur stor del av bladen som täcker marken. Detta påverkas av växtens utvecklingsstadium eftersom en fullt utvecklad gröda ofta täcker en större del av marken. Växtens biomassa och LAI, bladyteindex, kan vara bra mått för att visa i vilket utvecklingsstadium växten är. Delar av nedfallet som har hamnat på växterna kan sköljas bort av regn eller minska till följd av bladfällning och vind. Uppfångningsfraktionen och kvarhållningsfaktorn är mått på växtens uppfångning respektive kvarhållning.

Radioaktiva ämnen kan genom livsmedel överföras till människan. Cesium har ungefär samma egenskaper som kalium och strontium liknar kalcium. På grund av detta tar växter som tar upp kalium och kalcium även upp cesium och strontium. Mjölk, kött, spannmålsprodukter, grönsaker, vilt, svamp, bär och fisk är de vanligaste vägarna för människans intag av radioaktiva ämnen. För att minska överföringen av radioaktiva ämnen via näringskedjan till människor kan motåtgärder vidtas.

Den 26 april 1986 inträffade den hittills största olyckan inom kärnenergi vid kärnkraftverket i Tjernobyl i Ukraina. Ungefär 5 % av det  $^{137}\text{Cs}$  som släpptes ut föll över Sverige som drabbades relativt hårt. Delar av Västerbotten, Västernorrland, Gävleborg, Uppland och Västmanland fick det största nedfallet på grund av att det regnade samtidigt som det radioaktiva molnet passerade. Jordbruket påverkades mest samma år som olyckan inträffade, mjölk fick kasseras och hö kunde inte användas för

att utfodra djuren. Än idag kan skogssvamp och insjöfisk innehålla höga koncentrationer av  $^{137}\text{Cs}$ .

Japan drabbades den 11 Mars 2011 av en stor kärnenergiolycka då reaktorerna i kärnkraftverket i Fukushima Dai-ichi överhettades till följd av en jordbävning. Detta ledde till att radioaktiva föroreningar spreds till miljön. Olyckan vid Tjernobyl 1986 och olyckan vid Fukushima 2011 är de enda olyckor inom kärnenergin som graderats en sju på INES-skalan (International Nuclear and Radiological Event Scale). Sju motsvarar stor olycka och är så högt upp på skalan som man kan komma.

I detta examensarbete har uppfångning och kvarhållning av  $^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$  hos vete, vall och raps undersökts. Dessutom har påverkan från växternas biomassa, LAI och utvecklingsstadie på uppfångningen studerats. Vädret påverkar växternas kvarhållning av radioaktiva ämnen och därför har nederbörden efter deponering jämförts med kvarhållningen.

Arbetet har utförts i form av fältförsök där de olika grödorna har våtdeponerats med  $^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$  med hjälp av en regnmaskin. Deponeringarna har skett fyra gånger under sommaren 2011, i fyra olika utvecklingsstadier hos växterna. Vid varje deponering har växternas vägts och LAI har uppmätts. För att undersöka växternas kvarhållning har provtagning ägt rum samma dag som deponering samt ett och fem dygn efter deponering. Proverna har torkats och malts och sedan placerats i burkar. Radioaktiviteten i proverna har därefter mätts med hjälp av en HPGe-detektor som detekterar gammastrålning. Slutligen har uppfångningsfraktioner och kvarhållningsfaktorer beräknats.

Resultatet visar att uppfångningsfraktionen var störst vid det tredje växtutvecklingsstadiet för både vete och raps; degmognad för vete och fröutveckling för raps. Vallen, som slogs av efter två deponeringar, uppvisade störst uppfångningsfraktion vid andra växtutvecklingsstadiet, blomning. Hos raps och vall verkade uppfångningsfraktionen för  $^{85}\text{Sr}$  vara något högre vid samtliga växtutvecklingsstadier. För biomassan och uppfångningsfraktionen fanns ett positivt samband, för LAI och uppfångningsfraktionen var sambandet inte signifikant. Kvarhållningen visade en svag trend att minska med tiden, minskningen var störst under det första dygnet efter uppfångningen.

## ORDLISTA

**Aerosoler** små partiklar som är suspenderade i en gas. Typiska exempel är rök, dimma och luftföroreningar

**Aktivitet** används för att mäta den radioaktiva intensiteten, enheten är Becquerel (Bq) vilket motsvarar sönderfall per sekund

**Antineutrino** neutronens antipartikel

**Bakgrundsstrålning** strålning som orsakas av naturlig radioaktivitet, kommer från rymden, marken och människokroppen

**Becquerel (Bq)** SI-enheten för radioaktivt sönderfall, 1 Bq är ett sönderfall per sekund

**Halveringstid** den tid det tar för hälften av ett antal radioaktiva atomer att sönderfalla, enheten är sekunder

**HPGe-detektor** High Purity Germanium-detektor, används för att mäta radioaktiviteten i form av gammastrålning i ett prov

**IAEA** International Atomic Energy Agency

**INES** International Nuclear and Radiological Event Scale, sjugradig skala där 1-3 klassas som incidenter och 4-7 olyckor.

**Isotrop** materialet har samma egenskap i alla riktningar

**Joniserande strålning** partiklar eller fotoner med sådan energi att de kan slå ut elektroner från atomer eller molekyler som de kolliderar med

**Kvarhållning** definieras i detta arbete som aktiviteten vid en viss tidpunkt efter deponering [ $\text{Bq/m}^2$ ] dividerat med medelvärdet för aktiviteterna vid första provtagningen [ $\text{Bq/m}^2$ ], dvs. det som initialt fångats upp av växten

**LAI** (Leaf Area Index) = bladyteindex, anger andelen bladyta ovanför en markyteenhet [ $\text{m}^2/\text{m}^2$ ]

**Negatron** elektron, har negativ laddning

**Neutrino** elementarpartikel utan elektrisk laddning och med mycket liten massa som bildas vid bland annat betasönderfall

**Positron** negatronens antipartikel, en elektron med positiv laddning

**Radioaktivitet** egenskapen hos atomkärnor att spontant utsända joniserande strålning

**Radioekologi** omfattar kunskapen om radioaktiva ämnens nedfall, transport och effekter inom olika näringskedjor och ekosystem

**Radionuklid** en radioaktiv nuklid av ett visst ämne

**SSM** Strålsäkerhetsmyndigheten

**Stråldos** mått på energi som överförs till bestrålat objekt. Det finns flera olika begrepp för stråldoser, absorberad dos, ekvivalent dos och effektiv dos, enheten är gray eller sievert.

**Strålning** det finns joniserande och icke-joniserande strålning. Den icke-joniserande strålningen har inte lika mycket energi som den joniserande strålningen och kan därför inte jonisera material

**Sönderfall** spontan nukleär omvandling där nya ämnen bildas under utsändandet av joniserande strålning

**Uppfångningsfraktion**  $f$ , definieras som förhållandet mellan aktiviteten som hålls kvar av växten direkt efter deposition,  $A_i$  [Bq/m<sup>2</sup>], och den totala deponerade aktiviteten,  $A_t$  [Bq/m<sup>2</sup>], se ekvation 2

**Utvecklingsstadier** används för att fastlägga jämförbara tidpunkter i en grödas utveckling, stadierna uttrycks i en decimalskala från 0 till 100

**Vall** består av en blandning av gräs och baljväxter som torkas till hö eller konserveras till djurfoder

**Årsmån** väderleksbetingelser, som nederbörd och temperatur, under ett angivet år med avseende på växtodling

**Överföringsfaktor** används för att uttrycka kvoten av överföring av radioaktiva ämnen från ett led till ett annat led i näringskedjorna

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

REFERAT .....	I
ABSTRACT .....	II
FÖRORD .....	III
POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING .....	V
ORDLISTA .....	VII
1 INLEDNING .....	1
1.1 SYFTE .....	2
1.2 AVGRÄNSNINGAR.....	2
2 BAKGRUND .....	3
2.1 RADIOAKTIVITET .....	3
2.1.1 Joniserande strålning och radioaktivt sönderfall .....	3
2.1.2 Aktivitet och halveringstider .....	4
2.1.3 Strålkällor .....	4
2.1.4 Cesium och strontium.....	5
2.2 KONSEKVENSER VID RADIOAKTIVT UTSLÄPP .....	5
2.2.1 Spridning av radionuklider .....	5
2.2.2 Växters upptag och kvarhållning av radionuklider.....	6
2.2.3 Överföring till livsmedel .....	7
2.2.4 Hälsoeffekter .....	8
2.2.5 Motåtgärder .....	8
2.3 VETE, VALL OCH RAPS .....	9
2.3.1 Utvecklingsstadier .....	10
3 METODER.....	11
3.1 FÄLTFÖRSÖK .....	11
3.1.1 Områdesbeskrivning.....	11
3.1.2 Försöksupplägg.....	12
3.1.3 Grödor och utvecklingsstadier.....	13
3.1.4 Deponering med regnsimulator .....	16
3.1.5 Mätning av LAI .....	17
3.1.6 Provtagning.....	17
3.2 ANALYSMETODER.....	18
3.2.1 Mätning av radioaktivitet.....	18

3.2.2 Bearbetning av data .....	19
3.3 KLIMATDATA .....	20
4 RESULTAT .....	21
4.1 BIOMASSA OCH LAI .....	21
4.2 UPPFÅNGNING .....	23
4.2.1 Biomassa.....	24
4.2.2 LAI .....	25
4.2.3 Utvecklingsstadier .....	26
4.3 KVARHÅLLNING .....	27
5 DISKUSSION .....	30
5.1 BIOMASSA OCH LAI .....	30
5.2 UPPFÅNGNING .....	31
5.2.1 Jämförelse mellan uppfångningen av $^{134}\text{Cs}$ och $^{85}\text{Sr}$ .....	32
5.3 KVARHÅLLNING .....	32
5.3.1 Jämförelse mellan kvarhållningen av $^{134}\text{Cs}$ och $^{85}\text{Sr}$ .....	33
5.3 MOTÅTGÄRDER .....	33
5.4 FELKÄLLOR.....	34
6 SLUTSATSER .....	36
7 REFERENSER .....	37
BILAGOR .....	41

## 1 INLEDNING

År 2007 fanns det 439 kärnkraftverk i drift över hela världen och antalet väntades öka (IAEA, 2008). När kärnkraft används finns det alltid risk för att en olycka kan inträffa och även om olyckan sker långt bort kan Sverige drabbas av det radioaktiva nedfallet. Jod, cesium och radioaktiva ädelgaser är vanligast förekommande vid utsläpp. Strontium frisätts endast vid mycket höga temperaturer i reaktorhärden. Cesium och jod utgör de största riskerna eftersom de följer med nedfall till marken, medan de radioaktiva ädelgaserna försvinner snabbt i atmosfären (Andersson m.fl., 2002). Ett radioaktivt nedfall kan bl.a. resultera i kontaminerade grödor.

Den 26 april 1986 inträffade den hittills största olyckan inom kärnenergi vid kärnkraftverket i Tjernobyl i Ukraina. Reaktor 4 havererade under ett experiment och fattade eld. En stor del flyktiga ämnen från reaktorhärden släpptes ut och branden bidrog till att de radioaktiva ämnena fördes upp på hög höjd och på så sätt kunde spridas över stora områden (Moberg, 2011). Ungefär 5 % av det  $^{137}\text{Cs}$  som släpptes ut föll över Sverige som drabbades relativt hårt. Delar av Västerbotten, Västernorrland, Gävleborg, Uppland och Västmanland fick det största nedfallet på grund av att det regnade samtidigt som det radioaktiva molnet passerade (Moberg, 2001). Uppsala-området fick ett nedfall på ungefär  $20 \text{ kBq/m}^2$  och medelvärde över hela landet var  $10 \text{ kBq/m}^2$  (SGAB; 1986). Det högsta nedfallet i Sverige var omkring  $200 \text{ kBq/m}^2$ . Jordbruket påverkades mest samma år som olyckan inträffade, mjölk fick kasseras och hö kunde inte användas för att utfodra djuren. Om nedfallet hade kommit senare under växtsäsongen hade konsekvenserna antagligen blivit allvarigare (Johansson, 1996). Än idag kan skogssvamp och insjöfisk innehålla höga koncentrationer av  $^{137}\text{Cs}$  (Moberg, 2001). Japan drabbades den 11 Mars 2011 av en jordsbävning med magnituden 9 som resulterade i att reaktorerna på kärnkraftverket i Fukushima Dai-ichi överhettades och flera explosioner inträffade. Detta ledde till att radioaktiva föroreningar spreds till miljön (IAEA, 2011). Olyckan vid Tjernobyl 1986 och olyckan vid Fukushima 2011 är de största olyckorna inom kärnenergin och de har graderats till en sju på INES-skalan (International Nuclear and Radiological Event Scale) (SSM, 2011).

Eftersom radioaktivt nedfall kan leda till förhöjda halter av radioaktivitet i livsmedel och djurfoder och därmed överförs till människor är det intressant att undersöka hur olika ätbara växter påverkas av radioaktivt nedfall. Växtens utvecklingsstadium och därmed bladytans storlek vid nedfallet samt väderförhållandena mellan nedfall och skörd är viktiga faktorer som påverkar hur mycket radioaktivitet växten tar upp och håller kvar.

Studier om växters upptag av radionuklider har gjorts både i växthus och i fält, olika radionuklider har använts och olika växter har deponerats både genom torr- och våtdeposition. Vandecasteele m.fl. (2001) har våtdeponerat vårvete med radiocesium och radiostrontium, försöket skedde i växthus. Eriksson m.fl. (1998) har också våtdeponerat vete med radiocesium och radiostrontium, dock genomfördes deras försök i fält. Madoz-Escande m.fl. (2005) har gjort växthusförsök där gräsmarker har

deponerats med cesium, strontium, barium och tellurium. Även Carini m.fl. (2003) har våtdeponerat radiocesium och radiostrontium, men på jordgubbsplantor. Hoffman m.fl. (1995) har deponerat ett flertal radionuklider på träd och örter. Bunzl m.fl. (1989) har deponerat cesium, strontium och rutenium på barrträd. Aarkrog (1969) har deponerat spannmål med cesium, strontium, mangan och cerium. Bengtsson m.fl. (2011) har undersökt uppfångningen av  $^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$  hos vete och raps. Dessutom studerades kvarhållningen av radionukliderna vid skörd samt deras förflyttning i växten. Detta examensarbete är en sidostudie till Stefan Bengtssons doktorsavhandling, men här undersöks dessutom kvarhållning några dygn efter deponering. Spannmål och framförallt vete är bland de mest studerade växterna vad gäller upptag av radionuklider. Studier om växters kvarhållning de första dygnen efter deponering finns det inte särskilt gott om (Madoz-Escande m.fl., 2005) och raps är inte särskilt välstuderat. Denna studie är därför viktig för att ge mer kunskap om uppfångning och kvarhållning hos raps samt växters kvarhållning några dygn efter deponering. Kunskap om detta kan ge information om vilka motåtgärder som bör vidtas vid ett radioaktivt nedfall beroende på när under året och växtsäsongen det inträffar.

## 1.1 SYFTE

Syftet med detta examensarbete var att undersöka:

- 1.) Hur vårvete, vall och vårraps fångar upp  $^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$  som tillförts via våtdeposition.
- 2.) Hur växterna håller kvar den uppfångade radioaktiviteten under de första dagarna efter deponeringen.
- 3.) Dessutom undersöktes hur växtens utvecklingsstadium, biomassa och LAI samt hur väderförhållanden (nederbörd) efter deponering påverkar uppfångning och kvarhållning.

## 1.2 AVGRÄNSNINGAR

Arbetet har utförts i form av fältförsök och vissa omständigheter som väderförhållanden samt variationer i växtutveckling och mängd biomassa mellan försöksrutorna var svåra att påverka. Deponeringen har mestadels genomförts vid uppehållsväder för att undvika minskad uppfångning och kvarhållning i växten på grund av avsköljning och uttvättning, men vädret kan ändras snabbt och variationer har därför förekommit.

Vid deponering har  $^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$  använts eftersom deras isotoper  $^{137}\text{Cs}$  och  $^{90}\text{Sr}$ , som har längre halveringstider och därmed är mer skadliga, inte tillåts vid fältförsök. De radioaktiva lösningarna är dyra och fältförsök är tidskrävande, dessutom är de tillgängliga ytorna med tillstånd för våtdeponering av radioaktiv lösning begränsade. Av dessa anledningar har antalet deponeringar begränsats till fyra växtutvecklingsstadier och tre replikat av varje behandling. Samma regnintensitet har använts vid alla deponeringar. Vid mätning av radioaktiviteten har hela växten malts och mätningen har utförts på ett homogeniserat delprov på samtliga växtdelar som skördats, inte på individuella växtdelar.



## 2 BAKGRUND

### 2.1 RADIOAKTIVITET

Radioaktivitet är egenskapen hos atomkärnor att spontant utsända joniserande strålning. Henri Becquerel upptäckte radioaktiviteten 1896 genom observationen att anoder med uran sände ut strålning av sig själva. Inte långt senare visade Pierre och Marie Curie att torium betedde sig som uran. När de försökte isolera källan till strålningen upptäckte de polonium och radium (Magill & Galy, 2005a).

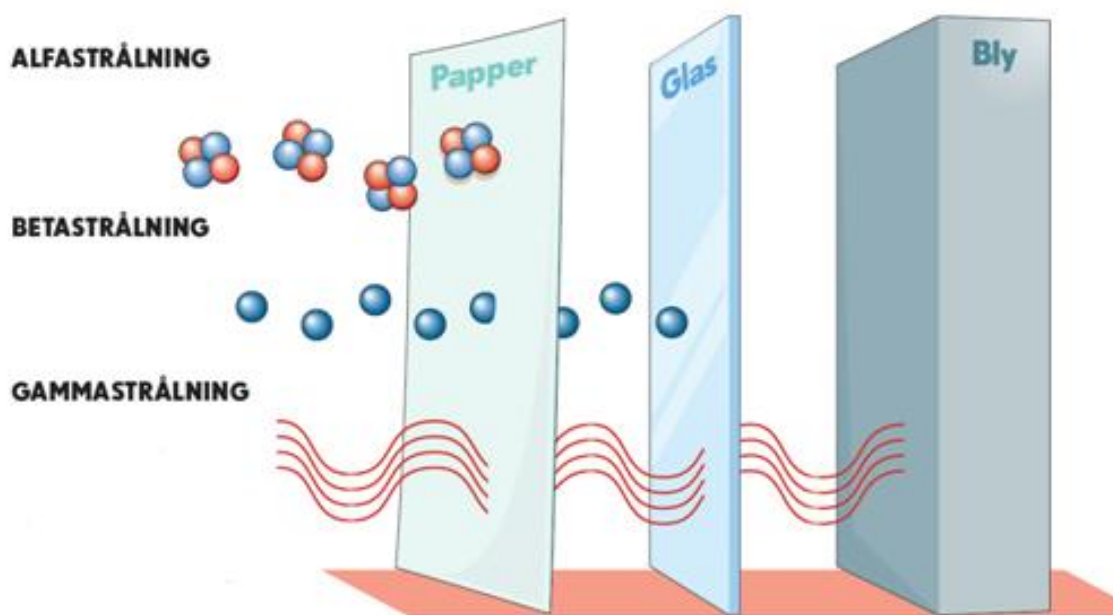
#### 2.1.1 Joniserande strålning och radioaktivt sönderfall

Radioaktivt sönderfall är en spontan nukleär omvandling där nya ämnen bildas. En ostabil föräldernuklid omvandlas till en mer stabil dotternuklid och om dotternukliden är ostabil fortsätter sönderfallet tills en stabil nuklid erhålls (Magill & Galy, 2005b). Vid sönderfallet avges joniserande strålning, som är partiklar eller fotoner med sådan energi att de kan slå ut elektroner från atomer eller molekyler som de kolliderar med. Det finns två typer av joniserande strålning, partikelstrålning och elektromagnetisk strålning. Partikelstrålning är energirika protoner, elektroner och neutroner (exempelvis alfa- och betastrålning) medan elektromagnetisk strålning är röntgen- och gammastrålning (Bergman m.fl., 1994). Alfa-, beta- och gammastrålning har olika räckvidd och därmed måste olika sorters skärmning användas, se figur 1. Dessa stråltyper beskrivs mer i detalj nedan.

Alfasönderfall förekommer i protonrika nuklider med ett högt atomnummer eftersom den utsända partikeln måste ha tillräckligt med energi för att komma över potentialbarriären i kärnan som är ungefär 25 MeV. Under processen sänds alfapartiklar ut vilket är partiklar med två protoner och två neutroner (heliumkärnor). Då dessa samverkar med materia avges deras energi och resultatet blir neutrala heliumatomer (Magill & Galy, 2005b). Alfapartiklar har en mycket kort räckvidd, mikrometer i fasta ämnen och vätskor och några centimeter i luft. På grund av detta är de vanligtvis inte farliga för människor, de absorberas i de yttre lagren av huden eller kläderna innan de kan orsaka skada (Andersson m.fl., 2002). Om alfapartiklar intas genom inandning eller förtärs är de däremot mycket skadliga eftersom en stor mängd energi frigörs på ett kort avstånd. Plutonium är ett exempel på en alfastrålare (Magill & Galy, 2005b).

Betasönderfall kan ske då kärnan har ett överskott eller ett underskott av neutroner vilket gör den instabil. Då kärnan har ett överskott av neutroner uppstår  $\beta^-$ -sönderfall som innebär att neutronen i atomkärnan omvandlas till en proton, en negatron (elektron) och en antineutrino. Negatronen som sänds ut utgör betastrålningen.  $\beta^+$ -sönderfall förekommer då kärnan har ett underskott av neutroner och alfastrålning inte är möjlig på grund av för låg energi. En proton i kärnan omvandlas till en neutron, en positron och en neutrino. Den utsända positronen utgör betastrålningen (Magill & Galy, 2005b). Räckvidden för betapartiklar är ungefär en centimeter i vävnad och något tiotal meter i luft, det räcker därför med en glasruta eller tjocka kläder som skärmning (Andersson m.fl., 2002). Exempel på betastrålare är jod, cesium och strontium.

Gammastrålning medföljer ofta alfa- och betasönderfall och är inte en primär sönderfallsprocess. Vanligtvis förekommer gammastrålning då en dotterprodukt av alfa- eller betastrålning är i ett exciterat tillstånd där dotterprodukten snabbt återvänder till grundtillstånd genom utsändning av en gammafoton (Andersson m.fl., 2002). Gammastrålar har ingen väldefinierad räckvidd som alfa- och betapartiklar utan förlorar en viss del av sin energi per enhet avstånd genom materia. De är starkt genomträngande och kan orsaka betydande skador på människor, därför krävs skärmning (Magill & Galy, 2005b). Tjocka skikt av tunga material som bly eller betong stoppar det mesta av strålningen (Andersson m.fl., 2002). Exempel på gammastrålande ämnen är jod och cesium.



**Figur 1** Räckvidden för alfa-, beta- och gammastrålning samt lämplig skärmning (SSM, 2011, med tillstånd).

### 2.1.2 Aktivitet och halveringstider

För att mäta den radioaktiva intensiteten används måttet aktivitet som har enheten Becquerel (Bq) vilket motsvarar sönderfall per sekund (SSM, 2010).

Den fysikaliska halveringstiden definieras som den tid det tar för hälften av ett antal radioaktiva atomer att sönderfalla (Choppin m.fl., 2002a). Den biologiska halveringstiden definieras som den tid det tar för hälften av ett intag att utsöndras ur kroppen. Denna är inte lika specifik som den fysikaliska halveringstiden utan varierar för olika djur- och växtarter samt med ålder och kön. En kombination av dessa halveringstider ger den effektiva halveringstiden (Bergman m.fl., 1994).

### 2.1.3 Strålkällor

Varje dag utsätts vi för naturlig bakgrundsstrålning som kommer från rymden och solen (kosmisk strålning), från marken och från människokroppen (Andersson m.fl., 2002). Det finns både naturliga och artificiella strålkällor. De grundämnen som finns i jordens

ytta idag är både stabila produkter av radionuklider och de radionuklider som har en halveringstid som är jämförbar med jordens ålder samt deras sönderfallsprodukter. Dessa brukar kallas terrestra eller primitiva källor av naturlig radioaktivitet. Dessutom finns det radionuklider orsakade av strålning från yttre rymden vilka kallas kosmogena källor (Pattenden, 2001). Fission är den viktigaste källan för artificiella radionuklider och de tre mest betydelsefulla fissionsprodukterna gällande radioekologi är  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{131}\text{I}$  och  $^{137}\text{Cs}$ . Artificiella radionuklider kan släppas ut i naturen genom normal drift av kärnkraftverk, förvar av kärnavfall, samt vid olyckor och kärnvapentester (Aarkrog, 2001).

### 2.1.4 Cesium och strontium

Cesium och strontium är två av de vanligaste radioaktiva ämnena som förekommer vid utsläpp till följd av kärnkraftsolyckor.  $^{90}\text{Sr}$  följer kalcium i näringskedjan och kan på så sätt ackumuleras i skelettet där dess effektiva halveringstid är lång. Dess dotter  $^{90}\text{Y}$  har en relativt hög betaenergi som ger en hög dos till kringliggande celler och mjärta.  $^{137}\text{Cs}$  liknar kalium och påträffas därför i muskelfävnader eller i växters växtsafter (Andersson m.fl., 2002). Tabell 1 visar att både  $^{90}\text{Sr}$  och  $^{137}\text{Cs}$  har långa halveringstider (Nordling & Österman, 2006). Isotoperna  $^{85}\text{Sr}$  och  $^{134}\text{Cs}$  har lägre halveringstider än  $^{90}\text{Sr}$  och  $^{137}\text{Cs}$ , men dess egenskaper är ändå liknande.

**Tabell 1** Halveringstider för några isotoper av cesium och strontium.

Isotop	Halveringstid
$^{137}\text{Cs}$	30 år
$^{134}\text{Cs}$	2 år
$^{90}\text{Sr}$	28 år
$^{85}\text{Sr}$	64,84 dagar

## 2.2 KONSEKVENSER VID RADIOAKTIVT UTSLÄPP

Radioekologi är en vetenskap som försöker förstå och förutsäga transporten av radionuklider genom naturliga och jordbruks-ekosystem till varierande mottagare som växter, djur och människor. Dessutom studeras effekterna av radioaktivitet i miljön på växter och djur (Alexakhin m.fl., 2001).

### 2.2.1 Spridning av radionuklider

Utsläppen från kärnkraftverk är under normal drift så pass små att effekterna troligen är försumbara för miljön. Vid en olycka däremot kan stora mängder radioaktiva ämnen släppas ut och spridas långt. Vilka ämnen som släpps ut och hur långt dessa sprids beror på temperaturutvecklingen och kärnkraftverkets säkerhetssystem. Vid omfattande olyckor som en härdsmälta eller explosion kan svärflyktiga ämnen släppas ut och dessa stiger upp i atmosfären på grund av sin höga temperatur (Andersson m.fl., 2002). Därefter transporteras de med vinden och faller så småningom till marken genom torr-

eller våtdeposition. Stora partiklar faller snabbare och resulterar i lokalt nedfall nära reaktorn. Mindre partiklar kan hålla sig svävande länge och under denna tid sönderfaller de mest kortlivade ämnena. Riktigt små partiklar kan transporteras runt jorden innan de faller till marken. Torrdeposition uppkommer då partiklar faller mot marken eller då partikelplymen berör växter och mark. Effektiviteten för torrdeposition minskar med partikelstorleken och beror även på egenskaperna hos ytan som plymen möter. Våtdeposition uppstår då nederbörd tvättar ut de radioaktiva ämnena och för dem till marken. Vid kraftig nederbörd kan koncentrationen hos nedfallet bli väldigt högt (Smith, 1998; Andersson m.fl., 2002).

## **2.2.2 Växters upptag och kvarhållning av radionuklider**

### ***Bladupptag***

Delar av nedfallet kan fångas in av växternas delar ovan mark vilket kallas direktdeposition. Uppfångningen kan variera mellan 10 % och 90 % av depositionen beroende på växtens storlek, form och ytstruktur. Lavar och mossor är exempel på växter som fångar in en stor del av nedfallet. Växtens utvecklingsstadium har också betydelse för hur stor del av nedfallet som direktdeponeras. För en fullt utvecklad gröda täcker ofta bladen en större del av marken och mer nedfall fångas upp. Detta har särskilt stor betydelse vid torrdeposition. Vid vegetationsperiodens början är uppfångningen låg och ökar därefter med biomassans tillväxt (Andersson m.fl., 2002; Rosén & Eriksson, 2008). Vid nederbörd ökar uppfångningen tills växtens uppfångningskapacitet är nådd, därefter minskar den med ökande regnmängd på grund av växtens begränsade förmåga att lagra vatten. Lagringskapaciteten av vatten och radionuklidens interaktion med bladytan beror på vilken kemisk form radionukliden har vid deponering. Olika valenser påverkar uppfångningen. Växtens yta har en elektronegativ laddning och verkar som katjonbytare, kvarhållningen blir därför mer effektiv för katjoner med fler valenser jämfört med anjoner. Uppfångningen är störst för  $^{140}\text{Ba}$  som beter sig liknande som strontium. Barium, som är en bivalent katjon, hålls kvar starkare till växten jämfört med cesium, som är en monovalent katjon (Pröhl, 2009). Envärda joner, som cesium och kalium, har högre rörlighet vid och efter upptag hos växter jämfört med tvåvärda joner, som strontium och kalcium (Eriksson & Rosén, 2000).

Uppfångningsfraktionen är ett mått på uppfångningen, se ekvation 2 (avsnitt 3.2.2). Uppfångningsfraktionen ökar med bladverkets utvecklingsgrad eftersom den hänger ihop med storleken på gränsytan mellan nederbörden och bladytan. Växtens utveckling kan uttryckas som växtens biomassa per markarea eller som LAI. LAI betyder bladyteindex och anger mängden bladyta per markyteenhet. I tidiga utvecklingsstadier är förhållandet mellan biomassa och bladyta god, men korrelationen minskar mot utvecklingens slut då biomassan ökar på grund av att frön och andra lagringsorgan växer medan bladytans area minskar. På grund av detta representerar LAI egenskaperna för gränsytan mellan nederbörd och bladyta bättre. Dock är biomassan betydligt enklare att mäta (Pröhl, 2009). Uppfångningsfraktionen för jordbrukssystem uppskattas ofta till 0,2-0,25 medan den för skogssystem är 0,7-0,8 (Nimis, 1996).

### ***Rotupptag***

Den del av nedfallet som inte kvarhålls av växten når marken och kan därmed tas upp via växternas rötter. Direktdeponering är viktigast det första åren efter nedfallet och därefter dominerar rotupptag (Rosén & Eriksson, 2008). Koncentrationen av radionuklider blir lägre vid upptag via rötterna jämfört med direktdeposition eftersom överföringen via rötterna till växten tar längre tid så att kortlivade ämnen hinner sönderfalla och nukliderna kan bindas i marken (Andersson m.fl., 2002). Växternas rotupptag påverkas av jordens lerhalt, mullhalt, näringsstatus, pH-värde samt markfuktighet. Mineraljordar och speciellt lerjordar kan fixera cesium vilket leder till ett lägre upptag hos växten. Mulljordar som har en hög organisk halt har en lägre bindingsstyrka av cesium och ger därmed ett högre upptag. Markens kalium/cesium kvot påverkar upptaget av cesium eftersom växtrötterna föredrar kalium framför cesium (Shaw & Bell, 1998; Andersson m.fl., 2002). Förflyttningen av strontium i jorden påverkas av kalciuminnehåll samt katjonbyteskapacitet. Strontium är mer rörligt i jorden jämfört med cesium, vilket till stor del på formationen av lösliga organiska komplex som ökar dess rörlighet (Shaw & Bell, 1998).

### ***Kvarhållning***

Delar av det direktdeponerade nedfallet överförs till marken via uttvättning med regnvatten, bladfällning samt vinderosion, vilket leder till lägre halter i växten. Halten kan också minska på grund av utspädning till följd av att växtens biomassa ökar vid tillväxt (Andersson m.fl., 2002). Vanligtvis räknar man med att ungefär 5-30 % av depositionen hålls kvar i grödan fram till skörden (Rosén & Eriksson, 2008). Fältförluster omfattar processer där radionuklidernas aktivitet på vegetationen minskar med tiden, radioaktivt sönderfall exkluderat. Processernas hastighet beror på vegetationstyp, tillväxttakt, väderförhållanden samt radionuklidens fysiska och kemiska egenskaper (Chadwick & Chamberlain, 1970).

### ***Förflyttning***

När radionukliderna väl har tagits upp av växten kan förflyttning inom växten ske vilket innebär att de omfördelas från de kontaminerade växtdelarna till andra delar. För att uppskatta koncentrationen av radionuklider i födoämnen samt fastställa doser till människor är det viktigt att ta hänsyn till denna förflyttning. Detta är särskilt viktigt för växter där endast vissa delar används som födoämnen, som spannmål och potatis. Förflyttningsfaktorer representerar förhållandet mellan den förflyttade aktiviteten i delar av växten som inte direktkontaminerades och den deponerade aktiviteten som växten mottog (Leclerc m.fl., 2009).

#### **2.2.3 Överföring till livsmedel**

Olika radioaktiva ämnen påverkar livsmedelsproduktionen under olika faser efter ett nedfall. De första dagarna efter ett nedfall är det radioaktivt jod som är det största problemet, därefter är det  $^{134}\text{Cs}$  och  $^{137}\text{Cs}$  samt  $^{85}\text{Sr}$  och  $^{90}\text{Sr}$  som dominerar. Efter ungefär ett år är det endast  $^{137}\text{Cs}$  och  $^{90}\text{Sr}$  som ger problem (Magill & Galy, 2005b).

Radioaktiva ämnen kan genom livsmedel överföras till människan och följer samma vägar i näringskedjan som likartade stabila ämnen. Cesium har ungefär samma egenskaper som kalium och strontium liknar kalcium. På grund av detta tar växter även upp cesium och strontium. Mjölk, kött, spannmålsprodukter, grönsaker, vilt, svamp, bär och fisk är de vanligaste vägarna för människans intag av radioaktiva ämnen (Andersson m.fl., 2002).

#### **2.2.4 Hälsoeffekter**

Bestrålning kan ske antingen externt eller internt. Vid extern bestrålning kommer bestrålningen från en strålkälla i omgivningen (i princip endast gammastrålning) och intern bestrålning uppkommer då radioaktiva ämnen intagits genom munnen, huden eller inandning (huvudsakligen alfa- eller betastrålning) (Bergman m.fl., 1994; Andersson m.fl., 2002).

För radionuklider som byggs in i strukturer som är stabila ökar riskerna. Isotoper av jod tas till stor del upp av sköldkörteln och byggs in i hormoner som lagras där och kan därför ge en hög dos lokalt (Bergman m.fl., 1994).

Strålskador som uppkommer kort tid efter bestrålningen kallas för akuta skador. Dessa skador utgörs av en funktionsnedsättning, på grund av celldöd, i ett eller flera organ och kan i värsta fall leda till döden. Strålning kan även leda till cancer och ärftliga skador vilka klassas som sena skador eftersom de uppträder lång tid efter bestrålningstillfället (Bergman m.fl., 1994; Johansson, 1996). Risken för att få cancer anses vara större än risken för att få ärftliga skador (Andersson m.fl., 2002).

#### **Gränsvärden**

Livsmedelsverket införde nationella gränsvärden för  $^{137}\text{Cs}$  i livsmedel efter Tjernobylyolyckan. Spannmål och kött från tamboskap har gränsvärdet 300 Bq/kg och gränsvärdet för vilt, insjöfisk, vilda bär, svamp och nötter är 1500 Bq/kg (Livsmedelsverket, 2010). EU har också fastställt gränsvärden, men dessa tillämpas först då en kärnenergiolycka inträffar och gäller endast en kortare tid. För strontiumisotoper gäller 75 Bq/kg i barnmat, 125 Bq/kg i mejeriprodukter, 125 Bq/kg i flytande livsmedel, 750 Bq/kg i övriga livsmedel och 7500 Bq/kg i mindre viktiga livsmedel (till exempel kryddor och vitaminer). Cesium har gränsvärdena 400 Bq/kg för barnmat, 1000 Bq/kg för mejeriprodukter och flytande livsmedel, 1250 Bq/kg för övriga livsmedel samt 12500 Bq/kg för mindre viktiga livsmedel (Andersson m.fl., 2002).

#### **2.2.5 Motåtgärder**

För att minska överföringen av radioaktiva ämnen via näringskedjan till människor kan motåtgärder vidtas. Vilka åtgärder som vidtas beror på när under året nedfallet har skett, nedfallets omfattning och sammansättning. För stråsäd och nysådd vall kan grödan slå av så fort som möjligt innan det radioaktiva nedfallet hinner nå jorden. Genom att föra bort den avslagna grödan avlägsnas även en del av nedfallet från fältet. En annan metod är att plöja ned ytskiktet och sedan så grödan på nytt. Då de radioaktiva ämnena blandas med en större volym minskar halten och dessutom kan radioaktivt cesium binda till

lerpartiklar och därmed bli mindre tillgängligt för växterna. En nackdel med plöjning är att de radioaktiva ämnena inte kan avlägsnas vid ett senare tillfälle och marksanering är i regel dyr och omfattande (Rosén & Eriksson, 2008)

Cesium har liknande egenskaper som kalium och därför kan kaliumgödsling leda till att växterna tar upp kalium istället för cesium om kalium finns i överskott. Genom att skörda senare späds de radioaktiva ämnena i grödan ut genom tillväxten, dessutom kan en del ytlagrade radioaktiva ämnen tvättas ut vid nederbörd. Eftersom halterna av de radioaktiva ämnena minskar med tiden kan lagring av de skördade grödorna minska deras halt av radioaktivitet. Detta används främst för att minska halterna av kortlivade ämnen. Inom djurhållningen finns det fler möjligheter till motåtgärder under den första tiden efter ett nedfall jämfört med växtodlingen där odlingssäsongen måste ha sin gång. Vid djurhållning kan betesgången avbrytas för installning av djuren där de utfodras med rent foder. Djuren kan även flyttas till mindre förorenade betesområden. Vall kan skördas med högre stubb för att minska halterna av radioaktiva ämnen (Andersson m.fl., 2002).

### **2.3 VETE, VALL OCH RAPS**

Vete, vall och raps är alla växter som används för mänsklig konsumtion på ett eller annat sätt. Livsmedel framställs från vete och raps och vall nyttjas som djurfoder. Radioaktivitet kan på så sätt överföras från växterna till människan. Dessa växter är därför intressanta att undersöka gällande upptag och kvarhållande av radionuklider.

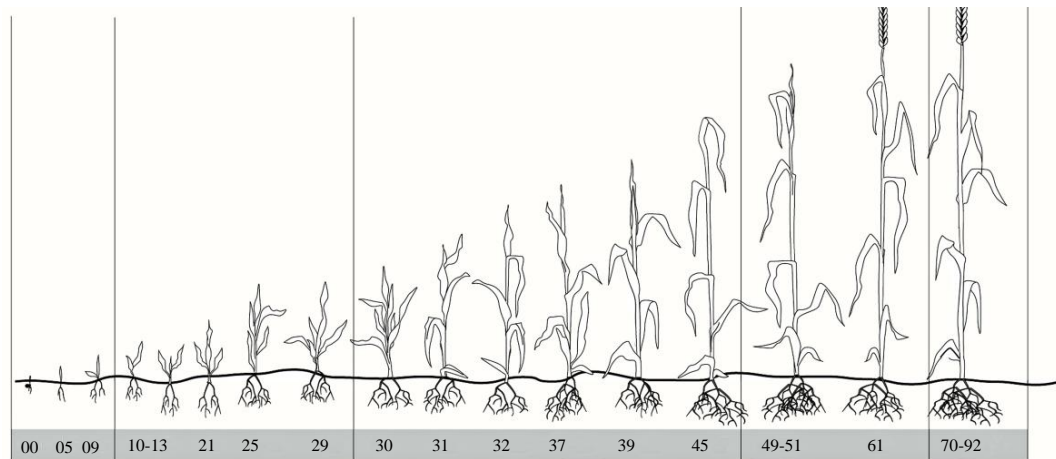
Vete är ett ettårigt gräs med breda, finhåriga, gröna blad. Stråna kan bli drygt en meter höga. Småaxen är oskaftade och rundade. Vete blommar i juni-juli. Det finns flera olika arter av vete och många olika sorter inom varje art. Vanligt vete (*Triticum aestivum* L.) har underarterna vår- och höstvete. I Sverige odlas vete mestadels i de södra delarna och omkring 60 % av skörden används som kreatursfoder medan resten används till vetemjöl, vetekross och vid framställning av alkohol (Anderberg, 2010).

Vallväxter består av en blandning av gräs och baljväxter. Dessa torkas till hö eller konserveras till djurfoder (LRF, 2009). Vall kan slå av och skördas 2 eller 3 gånger under växtsäsongen.

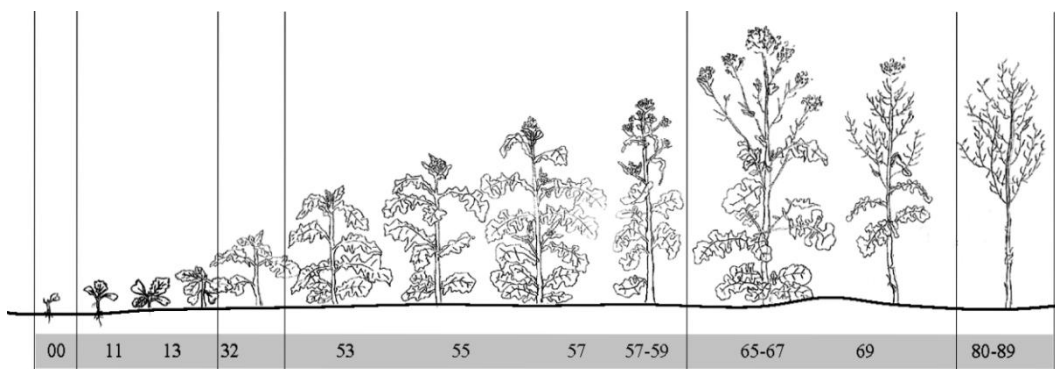
Raps (*Brassica napus* L.) dominerar helt odlingen av oljeväxter och höstraps är vanligast. Raps är storväxta ett- eller tvååriga örter med en stjälk som blir ungefär en meter hög. Bladen är kala och blågröna, blommorna är stora och klargula och skidorna är upp till en decimeter långa och en halv centimeter breda. Raps blommar i juni-juli och odlas i stora delar av landet. Fröna är oljerika och används till framställning av rapsolja och margarin (Anderberg, 2008).

### 2.3.1 Utvecklingsstadier

Utvecklingsstadier används för att fastlägga jämförbara tidpunkter i en grödas utveckling. Tidpunkten går då att jämföra oberoende av geografisk plats, sort eller årsmån. Stadierna uttrycks i en decimalskala från 0 till 100 (Jordbruksverket, 2011). Figur 2 och 3 visar de olika utvecklingsstadierna för vete och raps.



**Figur 2** Utvecklingsstadierna för vete, groning, bestockning, stråskjutning, axgång och mognad (Bayer Crop Science, 2011a, med tillstånd).



**Figur 3** Utvecklingsstadierna för raps, groning, bladutveckling, plantsträckning, knoppstadie, blomning och frömodnad (Bayer Crop Sciences, 2011b, med tillstånd (Tecknad av Nigrinis, 2010)).



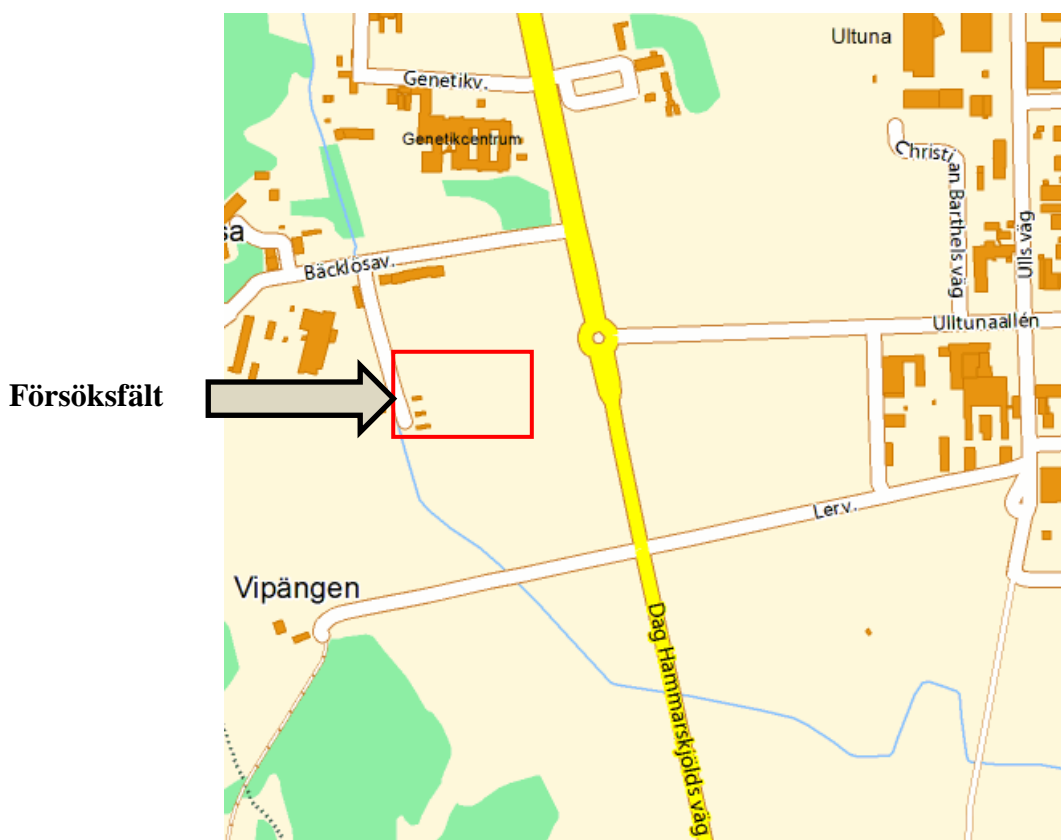
## 3 METODER

### 3.1 FÄLTFÖRSÖK

Vårvete, vall och vårraps våtdeponerades med radionuklider ( $^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$ ) i vattenlösning med hjälp av en regnsimulator. I fortsättningen kommer vårvete och vårraps att benämnas som vete och raps. Deponeringen skedde fyra gånger under sommaren 2011, vid fyra olika växtutvecklingsstadier. 1 mm radioaktivt regn med 40 kBq/m<sup>2</sup>  $^{134}\text{Cs}$  och 40 kBq/m<sup>2</sup>  $^{85}\text{Sr}$  deponerades per försöksruta. Denna radioaktivitet motsvarar ungefär dubbelt så mycket av nedfallet av  $^{137}\text{Cs}$  som föll över Uppsalaområdet efter Tjernobylolyckan (SGAB, 1986). Vid deponering mättes även LAI i varje deponerad försöksruta och väderdata samlades in via en klimatstation vid försöksfältet. För att studera kvarhållningen av de olika växterna skedde provtagningar vid tre olika tidpunkter efter deponering: samma dag (ungefär fyra timmar efter deponeringen), ett och fem dygn efter deponering. De provtagna växtdelarna torkades och maldes innan deras radioaktivitet mättes med hjälp av en HPGe-detektor.

#### 3.1.1 Områdesbeskrivning

Fältförsöket utfördes på ett inhägnat försöksområde vid Ultuna klimatstation, Vipängen, Bäcklösavägen 3, Uppsala, se figur 4. Jordarten på försöksfältet var lera.



**Figur 4** Karta som visar försöksfältets placering ([www.hitta.se](http://www.hitta.se), hämtad 2011-08-10).

### 3.1.2 Försöksupplägg

Försöksrutorna var 1 x 1 m och uppdelade på följande sätt:

3 växter (raps, vete och vall) x 3 (replikat av varje prov) x 4 (utvecklingsstadier) x 3 (tid efter deponering) +36 kontroller (en kontroll per block och växtutvecklingsstadium) → totalt 144 försöksrutor, varav 48 per växt. Figur 5 visar en del av försöksrutorna och en schematisk skiss över hela området finns i figur B1, bilaga 1.

Vid försöket användes randomiserad blockdesign (RBD) vilket innebär att rutornas numrering för varje block slumpgenererades med hjälp av Minitab. Det fanns tre block för varje gröda och varje block innehöll 16 provrutor. Vid varje utvecklingsstadium deponerades radionukliderna på 3 försöksrutor per block och en ruta per block var kontrollruta. Försöksrutorna provtogs samma dag som deponeringen samt ett och fem dygn efter. Provtagningen samma dag som deponeringen utfördes ungefär fyra timmar efteråt, då växterna hade torkat. På grund av växlande omständigheter så som väder provtogs rutorna inte precis lika lång tid efter deponeringen. Av okänd anledning växte det sämre i rutorna i de övre delarna av blocken för vete, rutorna närmast Dag Hammarskjölds väg. På grund av detta valde vi att, efter den första deponeringen, flytta dessa rutor till en annan plats på försöksfältet. Detta är inte idealiskt, men ansågs vara den bästa lösningen då skillnaden mellan växternas utveckling i de övre och nedre rutorna var för stor. Gula, gröna och rosa rutor, i figur B1 i bilaga 1, var de som flyttades från block 4, 5 och 6 till de två blocken nedanför.



**Figur 5** Översikt av försöksfältets övre del, närmast Dag Hammarskjölds väg. Längst ner i bilden syns block 4, följt av block 5 och 6. Längst upp syns block 7,8 och 9, täckta med växtduk.

### 3.1.3 Grödor och utvecklingsstadier

I detta försök användes vårvete (*Triticum aestivum* L. 'Triso'), vall innehållande rödklöver (*Trifolium pratense* L.), vitklöver (*Trifolium repens* L.), timotej (*Phleum pratense* L.), svingel (*x Festulolium loliaceum*) (Hudson) P. Fourn och rajgräs (*Lolium perenne* L.) och vårraps (*Brassica napus* L. 'Larissa')

De olika grödorna deponerades och provtogs vid fyra olika utvecklingsstadier under sommaren. Utvecklingsstadier med beskrivning och bilder för varje växt finns i tabell 2, 3 och 4 samt figur 6, 7 och 8.

#### Vårvete



**Figur 6** Växtutvecklingsstadier vid de fyra deponeringstillfällena (dp1, dp2, dp3 och dp4) för vete.

**Tabell 2** Utvecklingsstadier för vete samt beskrivning av dessa.

Deponering	Utvecklingsstadium	Beskrivning
1	34-36	Stråskjutning, 4-6 noder finns. Avståndet mellan noderna är 2cm eller mer.
2	61	Blomning, begynnande blomning.
3	83	Degmognad, begynnande degmognad, innehållet mjukt och ostigt.
4	91-99	Skördemognad.



## Vall

Vallen slogs av ungefär 10cm ovanför marken efter andra deponeringen och de avslagna växtdelarna fördes bort. Innan den tredje deponeringen fick vallen växa upp igen.



**Figur 7** Växtutvecklingsstadier vid de fyra deponeringstillfällena (dp1, dp2, dp3 och dp4) för vall.

**Tabell 3** Utvecklingsstadier med beskrivning för vall. Vall innehåller en blandning av gräs och baljväxter, här klassificeras och beskrivs utvecklingsstadierna för gräs först och därefter baljväxter.

Deponering	Utvecklingsstadium	Beskrivning
1	5/4	I ax/vippa, då del av axbärande strået är synligt mellan flaggblad och ax/vippa på minst halva antalet skott. Knoppning, enskilda knoppar i knoppsamlingar synliga på flertalet plantor.
2	6/5	Blomning, fr.o.m. att ståndarknappar är synliga. Begynnande blomning, öppna blommor är synliga på sidogrenars blomhuvud på flertalet plantor.
3	3/6	Begynnande ax/vippgång, del av ax/vippa är synlig på åtminstone några skott. Blomning, öppna blommor är synliga på sidogrenars blomhuvud på flertalet plantor.
4	6/7	Blomning, fr.o.m. att ståndarknappar är synliga. Överblommat, blommorna på huvudstjälkens blomhuvud är avblommade och blomfoderbladen börjar mörkfärgas på flertalet plantor.

## Vårraps



**Figur 8** Växtutvecklingsstadier vid de fyra deponeringstillfällena (dp1, dp2, dp3 och dp4) för raps.

**Tabell 4** Utvecklingsstadier för raps med beskrivning.

Deponering	Utvecklingsstadium	Beskrivning
1	14-18	Bladutveckling, 4-8 örtblad utvecklade.
2	63	Blomning, 50 % av knopparna på toppskottet blommar, äldre kronblad faller.
3	75	Fröutveckling, 50 % av skidorna har nått full storlek.
4	89	Frömognad, full mognad, nästan alla skidor är mogna.

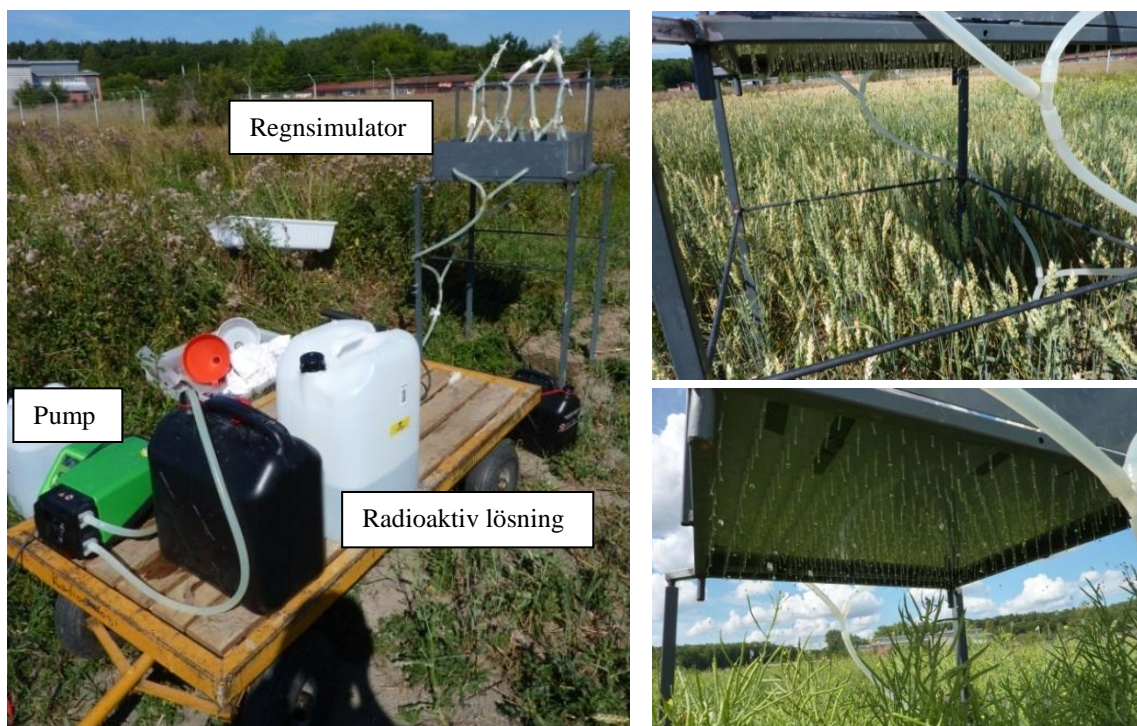


### 3.1.4 Deponering med regnsimulator

$^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$  deponerades i form av vattenlösning, med hjälp av en regnsimulator (figur 9). Regnsimulatoren som användes var en modifierad version av droppinfiltrometern som beskrivs av Joel & Messing (2001). Den deponerade ytan var 60 x 60 cm, i mitten av varje provruta. Den deponerades med 40 kBq/m<sup>2</sup> av de båda radionukliderna och den deponerade mängden var 1 mm/30 sekunder. Vindskydd användes vid deponering för det första utvecklingsstadiet för alla växter för att undvika att uppfångningen av radionuklider påverkades av vinden. Deponeringsintensiteten, 1 mm (1 L/m<sup>2</sup>), tillsammans med den deponerade ytan, 0,36 m<sup>2</sup> (0,6 x 0,6 m), ger att volymen deponeringsvätska per yta var 0,36 L. Deponeringen skedde fyra gånger under sommaren och för varje gröda behandlades nio rutor per tillfälle (tre rutor per block), datum för de olika deponeringstillfällena finns i tabell 5.

**Tabell 5** Datum för de olika växternas deponeringstillfällen under sommaren 2011.

Växt	Deposition	Datum	Växt	Deposition	Datum	Växt	Deposition	Datum
vall	1	26-maj	vete	1	22-jun	raps	1	22-jun
vall	2	16-jun	vete	2	07-jul	raps	2	07-jul
vall	3	08-aug	vete	3	01-aug	raps	3	01-aug
vall	4	01-sep	vete	4	01-sep	raps	4	11-sep



**Figur 9** Regnsimulatoren som användes vid deponering, med pump och deponeringsvätska.

Deponeringsvätskan blandades utifrån två stamlösningar innehållande CsCl (aq) respektive SrCl<sub>2</sub> (aq) samma dag som deponeringen utfördes. På grund av den fysikaliska halveringstiden ändras stamlösningarnas aktivitet med tiden. Därför gjordes

nya beräkningar för spädning och blandning utfördes vid varje deponering genom att användning av ekvation 1.

$$N(t) = N(0) * 2^{\frac{-t}{T_{1/2}}} \quad (1)$$

Där  $N(t)$  = aktivitet [Bq] som önskas vid deponering vid tidpunkt  $t$ ,  $N(0)$  = aktivitet [Bq] som var angiven på inköpt nuklidcertifikat,  $t$  = tid [dagar] efter angiven aktivitet för ampullerna och  $T_{1/2}$  = halveringstid [dagar].

Stamlösningarna bereddades utifrån två 5 mL ampuller med CsCl (aq) respektive SrCl<sub>2</sub> (aq) som späddes med CsCl-lösning respektive SrCl<sub>2</sub>-lösning tills den slutliga volymen var 1 L. CsCl och Sr Cl<sub>2</sub> användes för att undvika att Cs- och Sr-joner adsorberades av andra ämnen i lösningen. Ett överskott av en stabil isotop av samma ämne leder till att jonbytesplatserna mätas. Spädningen gjordes i plastflaskor för att undvika reaktioner mellan lösningarna och glasets yta (Letho & Hou, 2010). <sup>134</sup>Cs-ampullen hade aktiviteten 8,00 Mbq/mL den 25 maj 2011 och <sup>85</sup>Sr-ampullen hade aktiviteten 7,43 Mbq/mL den 15 maj 2011. Ampullerna innehöll 5 mL vilket innebär att den totala aktiviteten var 40 MBq för <sup>134</sup>Cs samt 37,15 MBq för <sup>85</sup>Sr, vilket innebär att stamlösningarna innehöll 40 MBq/L och 37,15 Mbq/L för <sup>134</sup>Cs respektive <sup>85</sup>Sr.

### 3.1.5 Mätning av LAI

LAI är ett uttryck för andelen bladyta per markyteenhet, dess enhet är m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. LAI mättes, med hjälp av ett LAI2000-instrument (LI-COR, Nebraska, USA), i varje provruta samma dag som deponering ägde rum. Instrumentet mäter mängden solstrålning ovanför vegetationen och den mängd strålning som når igenom bladverket. Förhållandet mellan dessa mätvärden beräknas och detta förhållande är växtens bladyteindex. Ju högre bladyteindexet är desto tätare är bladverket.

### 3.1.6 Provtagning

Växterna i de deponerade försöksrutorna skördades samma dag som deponeringen ägde rum samt ett och fem dygn efter. Första dagen skördades även kontrollrutorna. Vid skörd användes en trädgårdssax och växterna klipptes cirka 5 cm ovanför marken för att undvika att proverna blev förorenade med jord. Proven skördades i mitten av provrutan, på en yta av 25 x 25 cm och till hjälp användes en ram av ståltråd i samma mått. De avklippta växterna placerades i papperspåsar. Provernas färskvikt bestämdes innan de placerades i ett torkrum med temperaturen 30°C där de fick stå i ungefär 2-3 veckor. Provernas biomassa (torrvikt [kg]/ area [m<sup>2</sup>]) beräknades genom att dividera den uppmätta torrvikten med provtagningsytan, 0,0625 m<sup>2</sup> (0,25 x 0,25 m). Efter torkning bestämdes provernas torrvikt och därefter maldes de och placerades i 60 mL eller 35 mL burkar beroende på kvantitet. Om det fanns tillräckligt med prov användes en 60 mL burk, räckte mängden inte till för att fylla en sådan användes en 35 mL burk istället.

För vall slogs växterna av efter andra deponeringen och fick därefter växa upp igen, detta för att få en andra skörd.

## 3.2 ANALYSMETODER

### 3.2.1 Mätning av radioaktivitet

Radioaktiviteten [Bq/kg] mättes med hjälp av en HPGe-detektor där gammastrålningen detekteras. Mättiden valdes så att mätosäkerheten var mindre än 5 % och mätningarna pågick i minst en timme och högst 12 timmar. Kontrollerna tog längst tid eftersom de hade en lägre aktivitet.

#### *Halvledardetektorer*

Detektorer som används för att mäta strålning fungerar på så sätt att strålningens växelverkan med detektorn ger upphov till elektrisk laddning. Denna laddning samlas in och omvandlas till en elektrisk signal (Knoll, 2000a).

Halvledare består av material med en resistivitet som ligger mellan den för metaller och isolatorer. Kisel och germanium är exempel på sådana material. Eftersom gammapartiklar (fotoner) inte har någon laddning mäts aktiviteten genom fotonernas växelverkan (comptoneffekt, parbildning och fotoelektrisk effekt) med detektorns material vilket leder till elektrisk ström som kan mätas (Choppin m.fl., 2002b).

I halvledarmaterialet är elektronernas energi begränsad till olika energiband, det med lägre energi kallas valensband och det med högre energi kallas ledningsband. I valensbandet är elektronerna bundna till specifika platser i kristallen, medan de i ledningsbandet är fria och kan röra sig genom kristallen. De två banden separeras av ett bandgap vars storlek bestämmer om materialet är en halvledare eller isolator. Isolatorer har ett bandgap som är 5 eV eller mer medan halvledare har ett betydligt mindre bandgap. Kristallen har precis så många elektroner som behövs för att fylla alla platser i valensbandet och för rena ämnen vid låga temperaturer förblir ledningsbandet tomt och därmed har materialet ingen elektrisk ledningsförmåga (Knoll, 2000b).

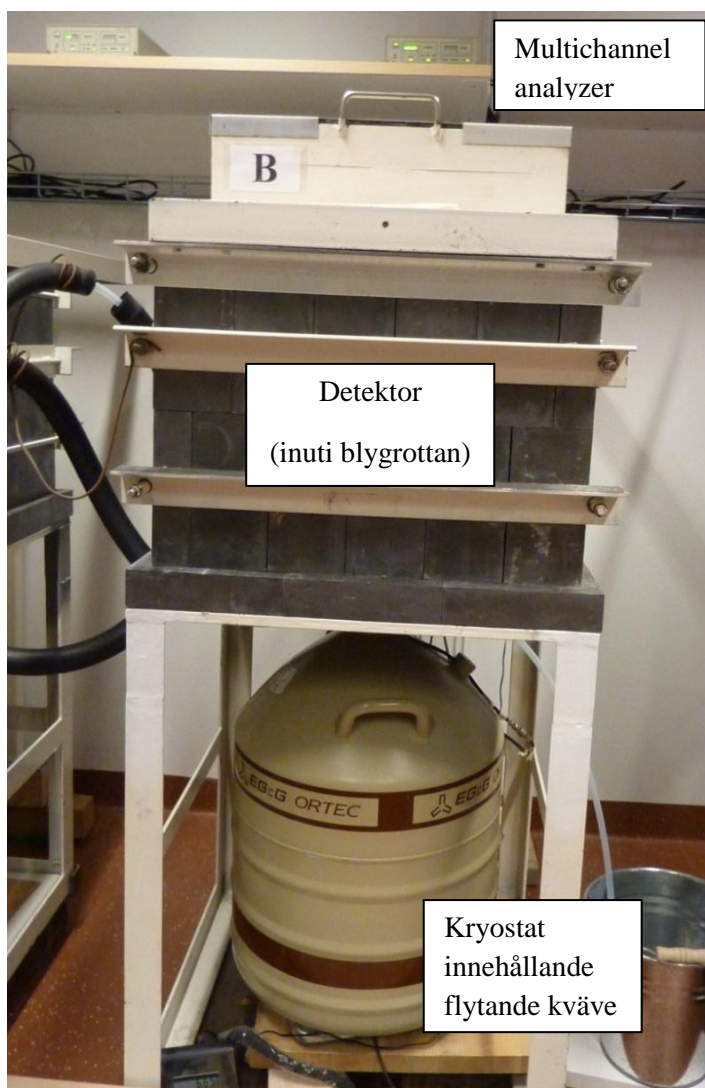
Gammapartiklarnas växelverkan ger en elektron som är bunden i valensbandet tillräckligt med energi för att förflytta sig till ledningsbandet. Ett hål i valensbandet skapas och då ett elektriskt fält införs kan elektronen i ledningsbandet flytta sig och hålet (en positiv laddning) kan också förflytta sig, men i motsatt riktning jämfört med elektronen. Förflyttningen leder till att en elektrisk signal skapas (Knoll, 2000b) och denna skickas till en förstärkare. Därefter konverteras signalens amplitud till ett likvärdigt digitalt nummer, varje kanal motsvarar en energi.

Det finns två typer av germanium-detektorer, Ge(Li)-detektorer som är dopade med litium för att kompensera för halvledarmaterialets orenheter och HPGe-detektorer där halvledarmaterialet har en mycket hög renhet. HPGe-detektorer har i stort sett ersatt Ge(Li)-detektorer (Knoll, 2000d).

På grund av att bandgapet är litet och leder till läckström vid rumstemperatur måste HPGe-detektorer kylas vid användning för att undvika brus som kan förstöra upplösningen. Vanligtvis används flytande kväve för att kyla detektorn till 77 K (-196,15°C) (Knoll, 2000c).



Detektorns effektivitet beror på hur många pulser som inträffar under ett givet antal gammastrålar (Canberra, 2010). En detektor med hög effektivitet kan fånga upp fler sönderfall vilket innebär en kortare mättid för att uppnå en viss noggrannhet jämfört med en detektor med lägre effektivitet. Gammastrålar som är oladdade måste växelverka med detektorn innan de kan detekteras och eftersom de kan färdas ett stort avstånd mellan växelverkningarna blir detektorns effektivitet ofta mindre än 100 % (Knoll, 2000c). De detektorer som användes i denna studie hade en effektivitet mellan 13 och 33 %, i figur 10 finns en bild på en av de detektorer som användes.



**Figur 10** En av de detektorer som användes för att mäta radioaktiviteten.

### 3.2.2 Bearbetning av data

Mätningarna utfördes med hjälp av programvaran Apex-Gamma Lab Productivity Suite (<http://www.canberra.com/products/823.asp>) där datan presenteras i form av ett mätspektrum som visar antalet sönderfall mot den energi som frigörs då de olika radionukliderna sönderfaller, se bilaga 6.

Radioaktiviteten mättes i Bq/kg torrsvikt. För att omvandla aktiviteten till Bq/m<sup>2</sup> multiplicerades provets aktivitet [Bq/kg] med dess torrsvikt per provtagen area [kg/m<sup>2</sup>].

### ***Fyllnadsgrad***

Mätvärden för burkar som inte var fyllda med växtprov till 100 % korrigerades med en korrektionsfaktor för fyllnadsgraden. Detta gjordes eftersom detektorn är kalibrerad för helt fyllda burkar och mätning på prover i burkar som inte är fyllda introducerar således ett mätfel. Korrektionsfaktorer togs fram genom att en lösning innehållande en konstant aktivitet av  $^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$  mättes vid ökande fyllnadsgrad. Korrektionsfaktorn beräknades genom att den uppmätta aktiviteten [Bq] vid fyllnadsgrad X % dividerades med aktiviteten vid 100 % fyllnadsgrad. Därefter plottades fyllnadsgraden mot korrektionsfaktorn och en trendlinje anpassades. Utifrån linjens ekvation beräknades korrektionsfaktorer för fyllnadsgraderna 10, 25, 50 och 75 %.

### ***Uppfångningsfraktionen och kvarhållningsfaktorn***

Uppfångningsfraktionen (interception fraction),  $f$ , definieras som förhållandet mellan aktiviteten som hålls kvar av växterna direkt efter deposition,  $A_i$  [Bq/m<sup>2</sup>], och den totala deponerade aktiviteten,  $A_t$  [Bq/m<sup>2</sup>] (Pröhl, 2000), se ekvation 2.

$$f = \frac{A_i}{A_t} \quad (2)$$

Uppfångningsfraktionen används för att bestämma hur mycket av den deponerade aktiviteten som har fångats upp initialt. I detta försök gjordes, som tidigare nämnts, de första provtagningarna ungefär fyra timmar efter deponering och aktiviteten vid dessa provtagningar användes för att bestämma  $f$ .

Kvarhållningsfaktorn definieras i detta arbete som aktiviteten vid en viss tidpunkt efter deponering dividerat med medelvärdet för aktiviteterna, hos de tre replikaten, vid första provtagningen, dvs. det som initialt fångats upp av växten. Enligt denna definition är kvarhållningsfaktorn lika med 1 vid tiden 0.

## **3.3 KLIMATDATA**

Klimatdata har hämtats från Institutionen för Växtproduktionsekologi som har en klimatstation vid försöksfältet ([http://grodden.evp.slu.se/slu\\_klimat/index.html](http://grodden.evp.slu.se/slu_klimat/index.html)). Timmedelvärden för temperatur och vindhastighet har använts för att undersöka om dessa faktorer har någon påverkan på uppfångningen. Data för nederbörden uppmätt varje timme har använts för att undersöka dess påverkan på växternas kvarhållning. För att förenkla i analysen antogs det att första provtagningen efter deponeringstillfället ägde rum klockan 15.00 samma dag.

## 4 RESULTAT

I denna sektion undersöks om det finns något samband mellan biomassa och LAI (4.1), mellan uppfångningsfraktion och LAI samt mellan utvecklingsstadium och uppfångningsfraktion (4.2). Sektionen avslutas med att eventuella samband mellan kvarhållningsfraktion och tiden efter deponering samt nederbörd efter deponering undersöks (sektion 4.3). För kontrollrutorna erhöles värden för radioaktiviteten som låg nära noll, se tabell B1, B2 och B3 i bilaga 2.

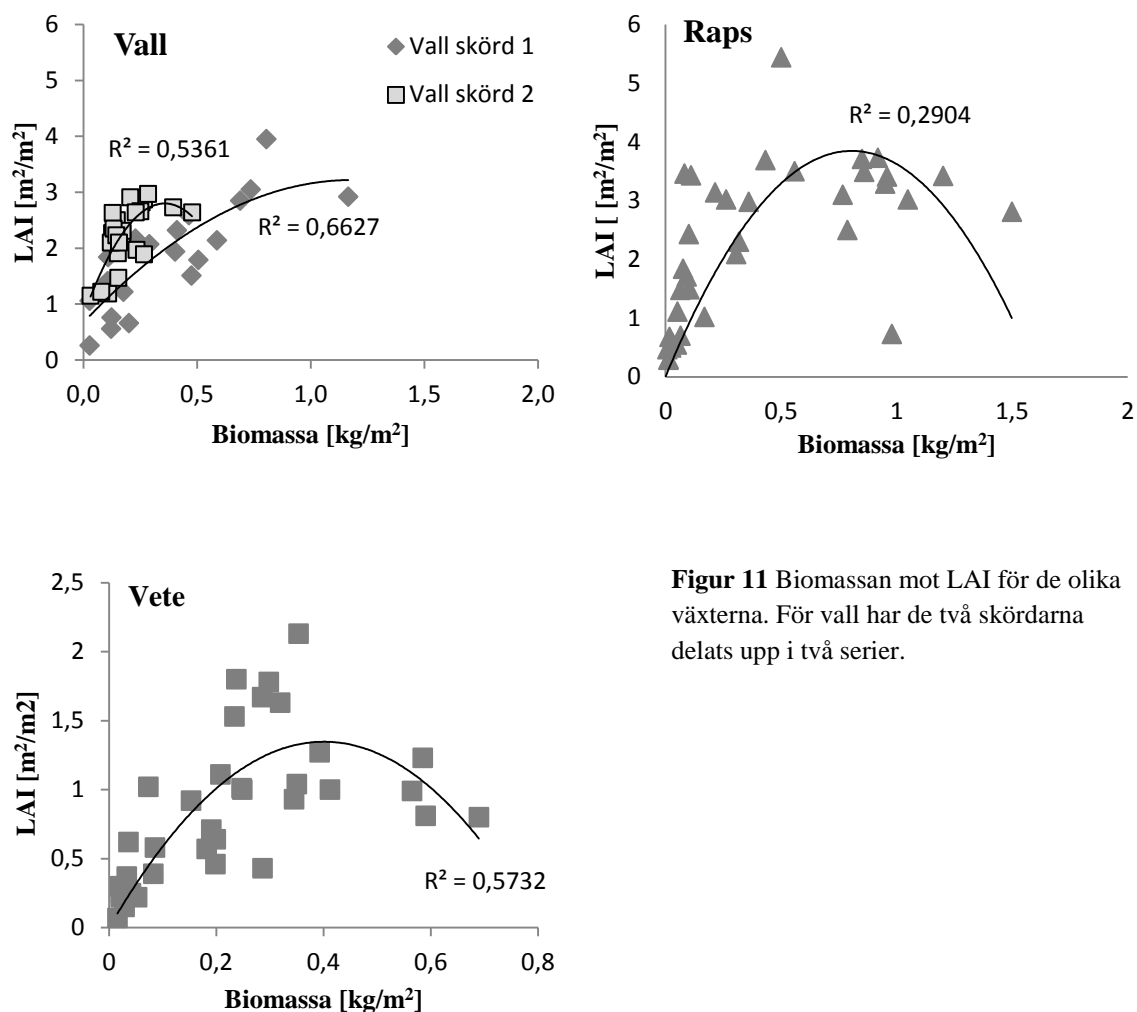
### 4.1 BIOMASSA OCH LAI

Biomassan för vall ökade fram till andra deponeringen för att sedan minska. Från tredje till fjärde deponeringen skedde återigen en ökning. För både vete och raps ökade biomassan fram till tredje deponeringen för att sedan minska något, se tabell 6. LAI verkar följa samma beteende som biomassan med undantag för den tredje deponeringen för vete där värdet var väldigt lågt. För raps var minskningen av LAI från tredje till fjärde deponeringen stor. Tabell 6 innehåller endast medelvärden beräknade utifrån fullständiga värden som finns i tabell B1, B2 och B3 i bilaga 2.

**Tabell 6** Medelvärden av LAI och biomassa, samt standardavvikelser, för mätvärden från alla provtagningar. Varje värde i tabellen består av ett medelvärde av 12 mätvärden. Dock saknas tre värden för LAI och ett värde för biomassan för dp1 för vall.

Växt	Dp	Biomassa [kg/m <sup>2</sup> ]	LAI [m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]
Vall	1	0,23±0,22	1,06±0,55
	2	0,53±0,28	2,47±0,65
	3	0,16±0,07	2,05±0,67
	4	0,23±0,11	2,44±0,32
Vete	1	0,04±0,02	0,31±0,16
	2	0,24±0,08	1,36±0,45
	3	0,67±0,29	0,13±0,13
	4	0,4±0,17	0,85±0,28
Raps	1	0,05±0,05	0,77±0,42
	2	0,24±0,15	2,96±1,02
	3	0,95±0,24	3,06±0,82
	4	0,91±0,29	0,82±0,13

Uppfångningsfraktionen beror på växtens utvecklingsstadium och LAI representerar detta bäst. Dock är biomassan betydligt enklare att mäta och kan därför vara bättre att använda. I figur 11 visas biomassan mot LAI.



**Figur 11** Biomassan mot LAI för de olika växterna. För vall har de två skördarna delats upp i två serier.

Trendlinjerna för sambandet mellan biomassa och LAI har anpassats utifrån resultat från en liknande studie av Vandecasteele m.fl. (2001). För vall ökade LAI med biomassan för att sedan minska något. Detta gällde både skörd 1 och skörd 2, dock ökade biomassan betydligt mer för skörd 1. Ett polynomiskt samband mellan biomassa och LAI påvisades där  $R^2$  låg runt 0,5. Sambandet var statistiskt signifikant för både skörd 1 och skörd 2, med 95 % säkerhet. För raps plockades mätvärdena för dp4 bort på grund av att variationen i biomassan var orimligt stor. Utan dessa värden kunde ett svagt polynomiskt samband påvisas med  $R^2$  runt 0,3, dock var sambandet inte statistiskt signifikant med 95 % säkerhet ( $p = 0,116$ ). För vete fanns ett polynomiskt samband där LAI först ökade med biomassan för att sedan minska.  $R^2$  var ungefär 0,5 och sambandet var statistiskt signifikant med 95 % säkerhet. Dock plockades alla värden vid deponering tre bort eftersom LAI var orimligt lågt där och ett systematiskt mätfel misstänktes.

## 4.2 UPPFÅNGNING

Uppfångningsfraktionen ( $f$ ) avser den initiala kvarhållningen och kan därför endast beräknas för försöksrutor som provtogs samma dag som deponeringen ägde rum. I denna sektion undersöks inverkan av biomassa, LAI och utvecklingsstadium på uppfångningsfraktionen. En sammanfattning av dessa värden finns i tabell 7. Här finns även värden för temperatur och vindhastighet vid deponering eftersom vädret kan påverka uppfångningen. Fullständiga värden för biomassa, LAI och uppfångningsfraktion finns i tabell B1, B2 och B3 i bilaga 2, samt tabell B9, B10 och B11 i bilaga 5.

**Tabell 7** Medelvärden för LAI, biomassa och uppfångningsfraktion, med standardavvikelser, för de olika växterna vid de fyra olika växtutvecklingsstadierna samt temperatur och vindhastighet vid deponeringstillfället (dp). Värdena gäller endast provtagningarna som utfördes ungefär fyra timmar efter deponering. Varje medelvärde för LAI, biomassa och uppfångningsfraktion kommer från tre mätvärden, förutom värdena för dp1 för vall eftersom en försöksruta fick uteslutas där.

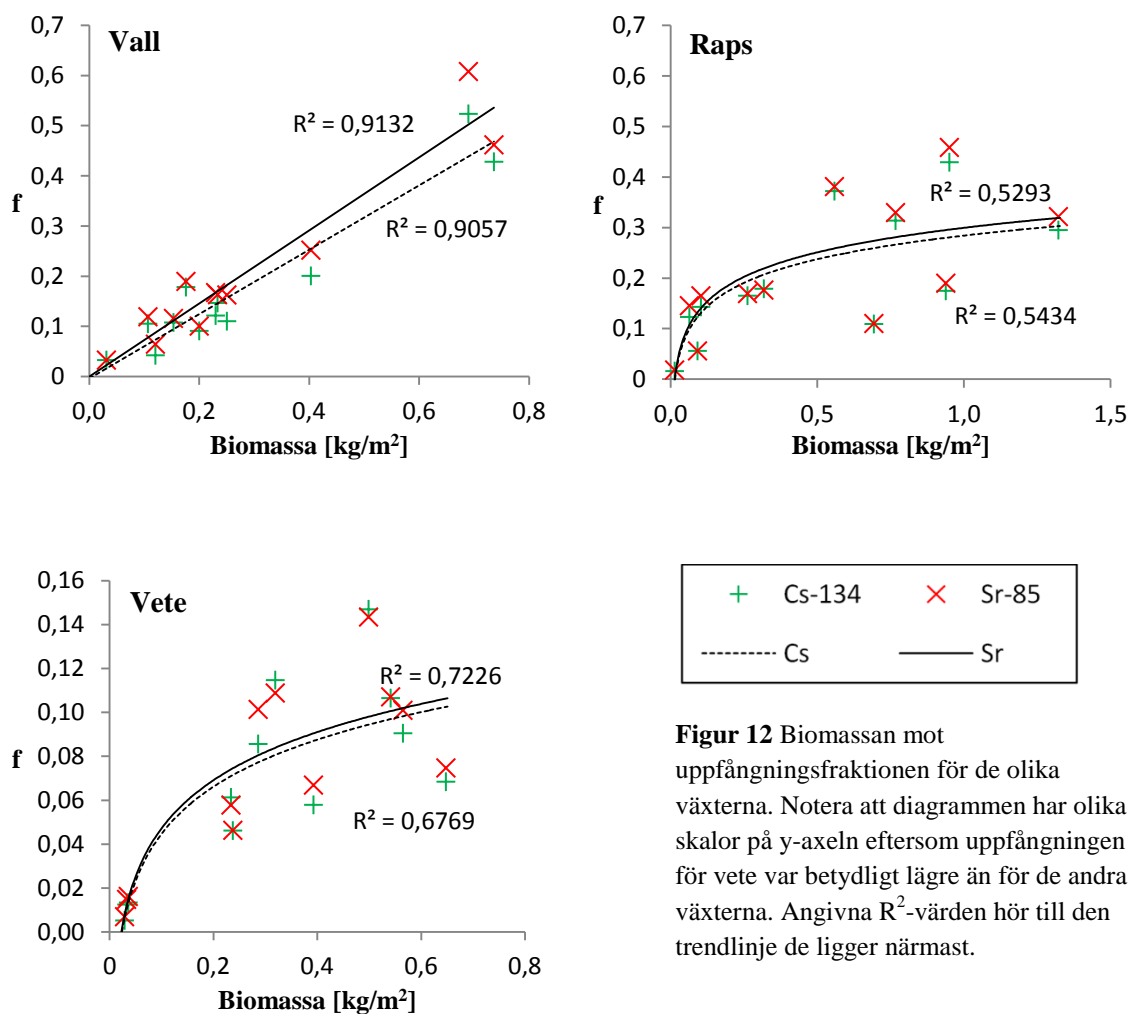
Växt	Dp	LAI[m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	Biomassa[kg/m <sup>2</sup> ]	Temp[°C]	Vind[m/s]	Uppfångningsfraktion	
						<sup>134</sup> Cs	<sup>85</sup> Sr
<b>Vall</b>	1	1,10±0,39	0,16±0,05	15	3,5	0,13±0,05	0,14±0,05
	2	2,61±0,59	0,61±0,18	15	4,1	0,39±0,16	0,44±0,18
	3	1,53±0,41	0,14±0,10	18	7,2	0,10±0,06	0,10±0,07
	4	2,47±0,32	0,20±0,07	17	3,9	0,09±0,04	0,13±0,06
<b>Vete</b>	1	0,38±0,24	0,03±0,00	15	5,2	0,01±0,01	0,01±0,01
	2	1,65±0,14	0,26±0,05	22	3,3	0,07±0,04	0,07±0,03
	3	0,06±0,03	0,56±0,08	22	4,7	0,11±0,04	0,11±0,03
	4	0,90±0,43	0,42±0,14	16	5,4	0,08±0,02	0,09±0,02
<b>Raps</b>	1	1,09±0,68	0,06±0,04	15	5,2	0,10±0,06	0,12±0,07
	2	2,34±0,66	0,22±0,12	22	3,3	0,14±0,05	0,14±0,05
	3	3,30±0,20	0,76±0,20	22	4,7	0,37±0,05	0,39±0,06
	4	0,77±0,08	0,98±0,32	17	3,9	0,19±0,09	0,21±0,10

Uppfångningsfraktionen för vall ökade fram till andra deponeringen och mellan tredje och fjärde deponeringen var förändringen liten. För vete och raps ökade  $f$  fram till den tredje deponeringen för att sedan avta. Maximum för vall var 0,39 för <sup>134</sup>Cs och 0,44 för <sup>85</sup>Sr, för vete 0,11 för båda radionukliderna och för raps 0,37 för <sup>134</sup>Cs och 0,39 för <sup>85</sup>Sr.  $f$  för vete var lägre än för vall och raps. <sup>85</sup>Sr hade något högre uppfångningsfraktion jämfört med <sup>134</sup>Cs för vall och raps, men för vete var skillnaden obetydlig.

Lufttemperaturen låg mellan 14-22°C och var som högst vid andra och tredje deponeringstillfället för både vete och raps, se tabell 7. Vindhastigheterna var relativt låga vid alla deponeringstillfällen. Vindskydd användes vid deponering för det första utvecklingsstadiet för alla växter och därmed påverkades inte själva deponeringen av vinden. Däremot kan avdunstningen efter deponering samt hur länge dropparna ligger kvar på bladytan påverkats av vinden.

### 4.2.1 Biomassa

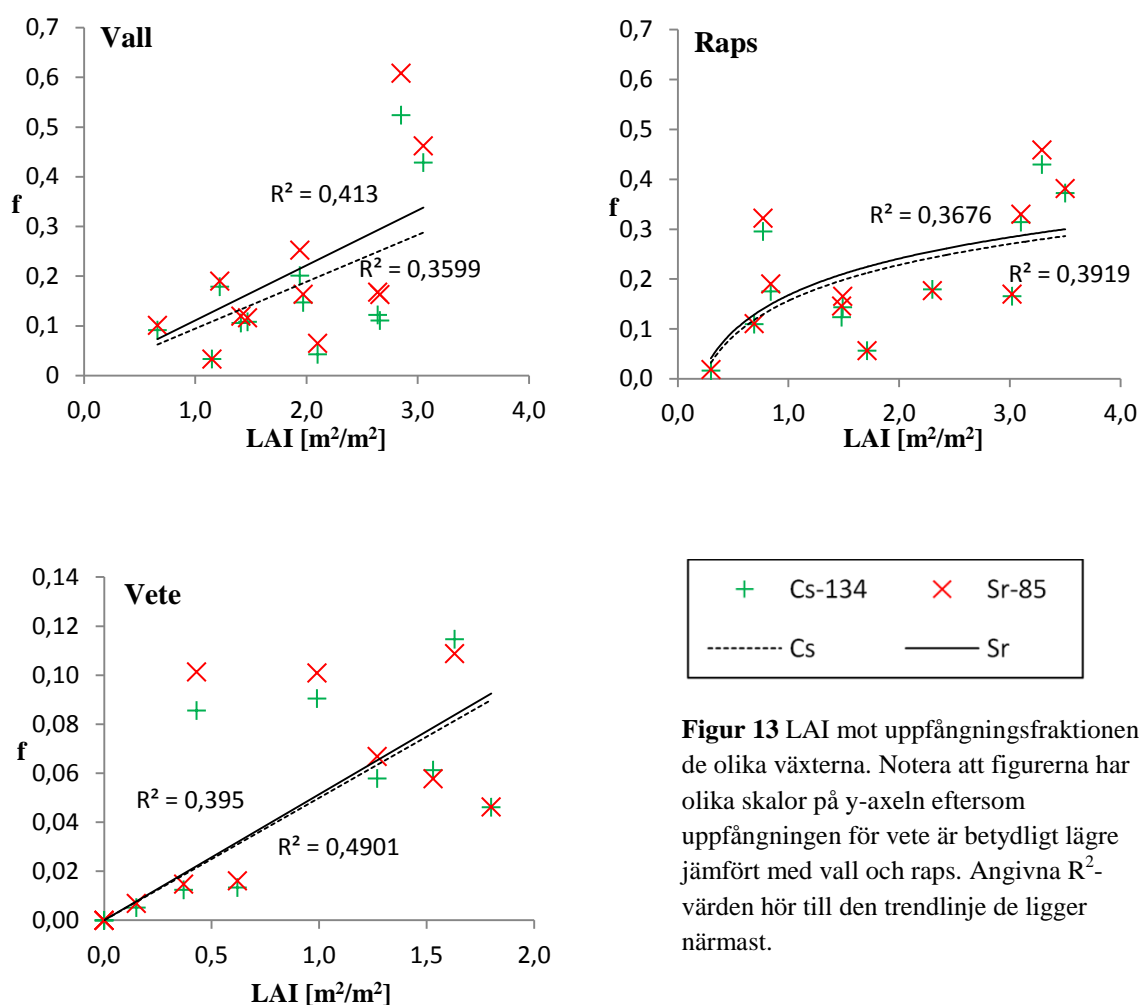
För vall fanns ett linjärt samband mellan uppfångningen och biomassan, med  $R^2$  runt 0,9 för både  $^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$ . Sambandet var statistiskt signifikant med 95 % säkerhet för båda radionukliderna. För raps och vete fanns ett logaritmiskt samband där biomassan ökade exponentiellt med  $f$  och  $R^2$  var runt 0,5 för raps och 0,7 för vete. Även dessa samband var statistiskt signifikanta med 95 % säkerhet. Vid jämförelse av  $^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$  kunde ingen betydande skillnad för någon av växterna påvisas.



**Figur 12** Biomassan mot uppfångningsfraktionen för de olika växterna. Notera att diagrammen har olika skalor på y-axeln eftersom uppfångningen för vete var betydligt lägre än för de andra växterna. Angivna  $R^2$ -värden hör till den trendlinje de ligger närmast.

## 4.2.2 LAI

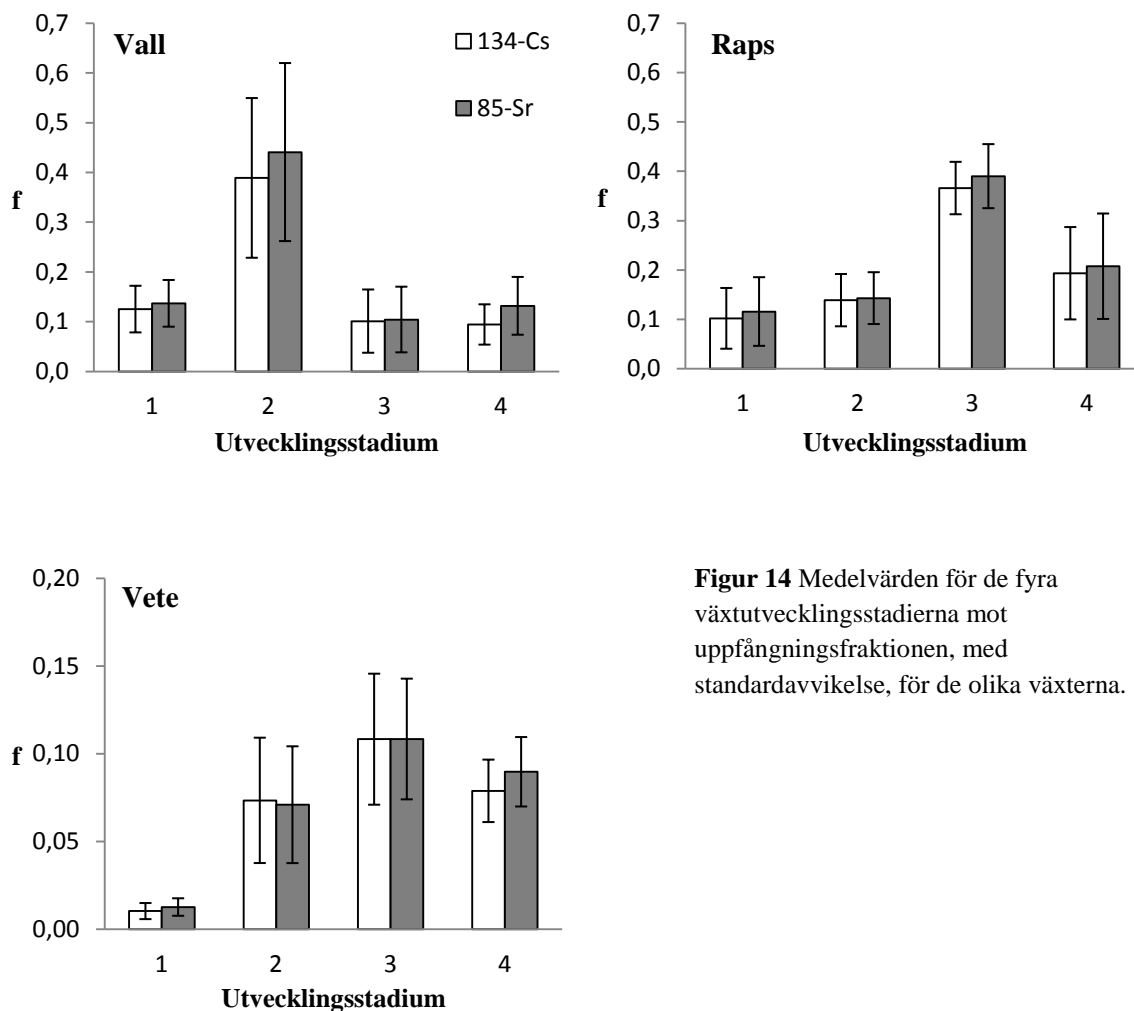
I figur 13 visas alla beräknade uppfångningsfraktioner i relation till LAI. Ett svagt samband mellan LAI och  $f$  kunde påvisas för alla växterna.  $R^2$  låg runt 0,4 för vall och raps och 0,6 för vete. För vall och vete var sambandet linjärt medan det var logaritmiskt för raps. För vete har tre punkter vid deponering 3 plockats bort på grund av att värdena för LAI var orimligt små, se tabell B2, bilaga 2. Det fanns ingen betydlig skillnad mellan  $^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$ . Sambandet var endast statistiskt signifikant för vall, med 95 % säkerhet.



**Figur 13** LAI mot uppfångningsfraktionen de olika växterna. Notera att figurerna har olika skalor på y-axeln eftersom uppfångningen för vete är betydligt lägre jämfört med vall och raps. Angivna  $R^2$ -värden hör till den trendlinje de ligger närmast.

### 4.2.3 Utvecklingsstadier

Figur 14 visar medelvärden av uppfångningsfraktionen, med standardavvikelser, hos de olika växterna vid de fyra olika växtutvecklingsstadierna. Observera att vete har en annan skala för uppfångningsfraktionen eftersom dess uppfångning är betydligt lägre jämfört med vall och raps i alla utvecklingsstadier. För vall skedde en ökning mellan stadium 1 och 2 samt mellan stadium 3 och 4 och uppfångningen var betydligt större vid stadium 2, blomning, jämfört med de andra stadierna. Uppfångningsfraktionen ökade från stadium 1 till stadium 3 för både vete och raps, därefter skedde en minskning till stadium 4. Uppfångningen var störst vid blomning för vall, fröutveckling för raps och degmognad för vete. För både vall och raps var uppfångningsfraktionen för  $^{85}\text{Sr}$  något högre än den för  $^{134}\text{Cs}$ . Jämför man de olika växterna med varandra syntes det tydligt att vete överlag har en betydligt lägre uppfångningsfraktion.

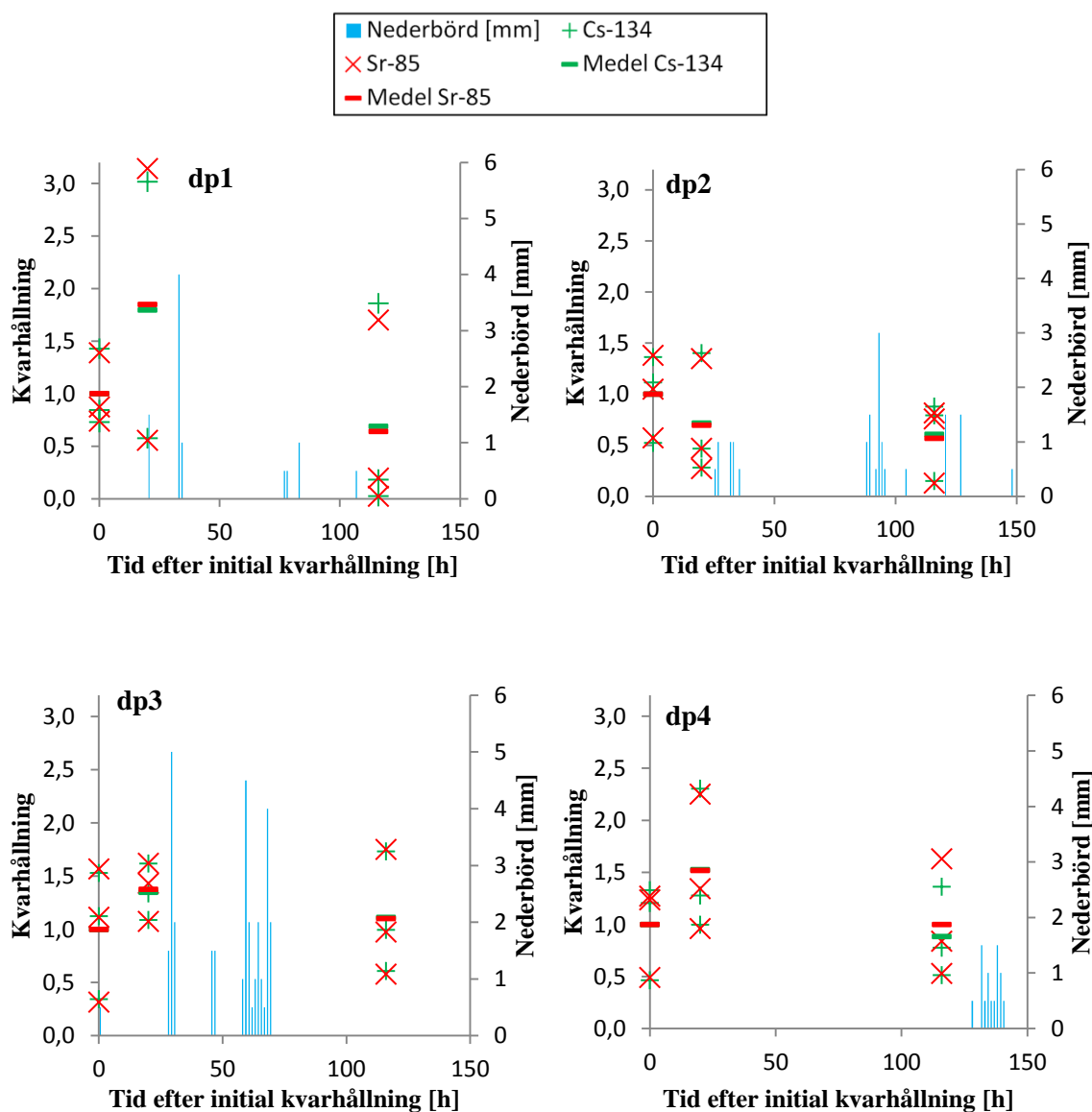


**Figur 14** Medelvärden för de fyra växtutvecklingsstadierna mot uppfångningsfraktionen, med standardavvikelse, för de olika växterna.



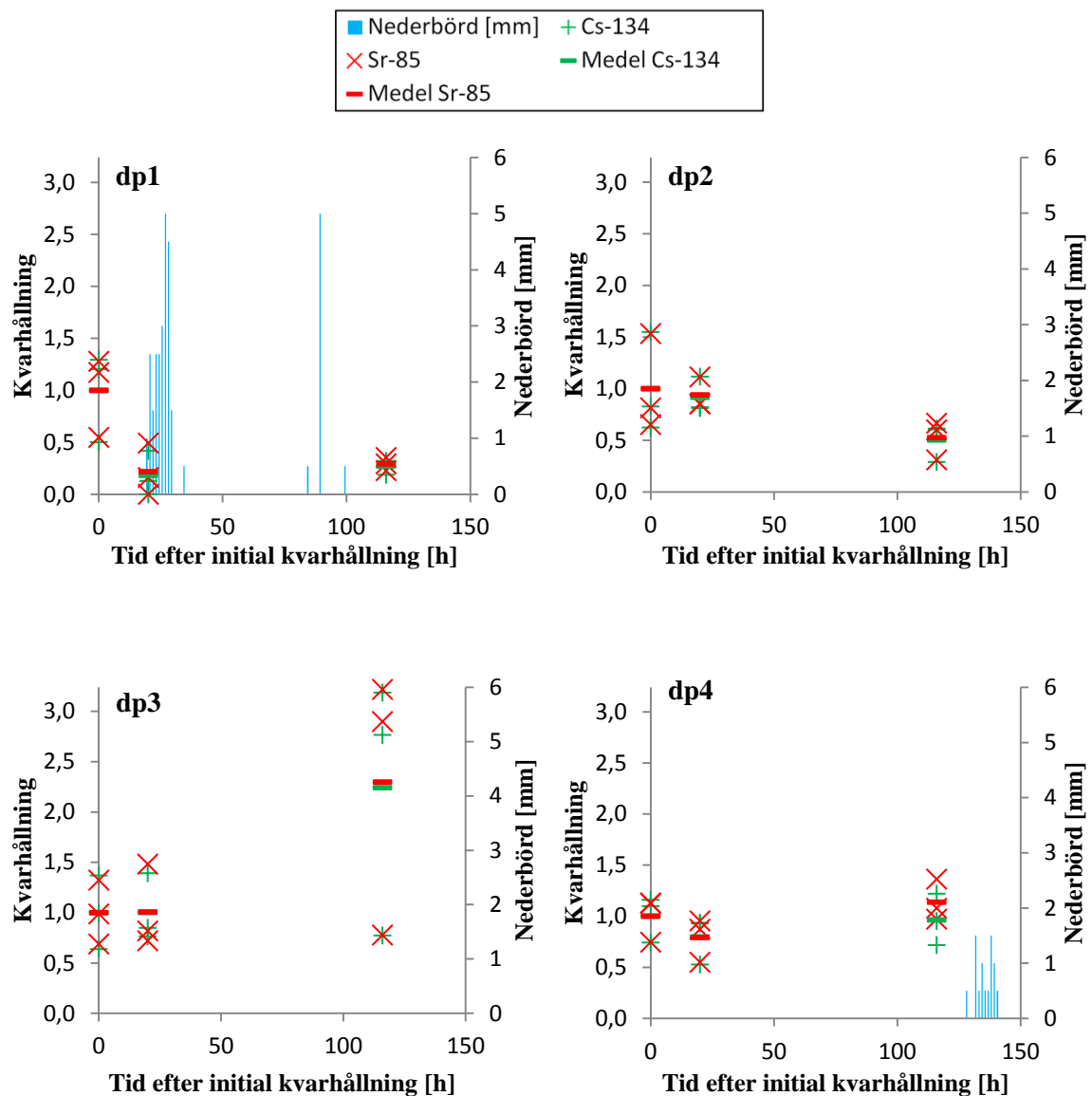
### 4.3 KVARHÅLLNING

I detta avsnitt undersöks hur kvarhållningen av  $^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$  ändras med tiden samt om nederbörd påverkar. Både medelvärden och värden för individuella provtagningar för kvarhållningsfaktorn visas i figur 15, 16 och 17, eftersom det ibland förekommer en stor variation. Provtagningar genomfördes ett och fem dygn efter den första provtagningen vilket antas vara 20 respektive 116 timmar i figur 15, 16 och 17.



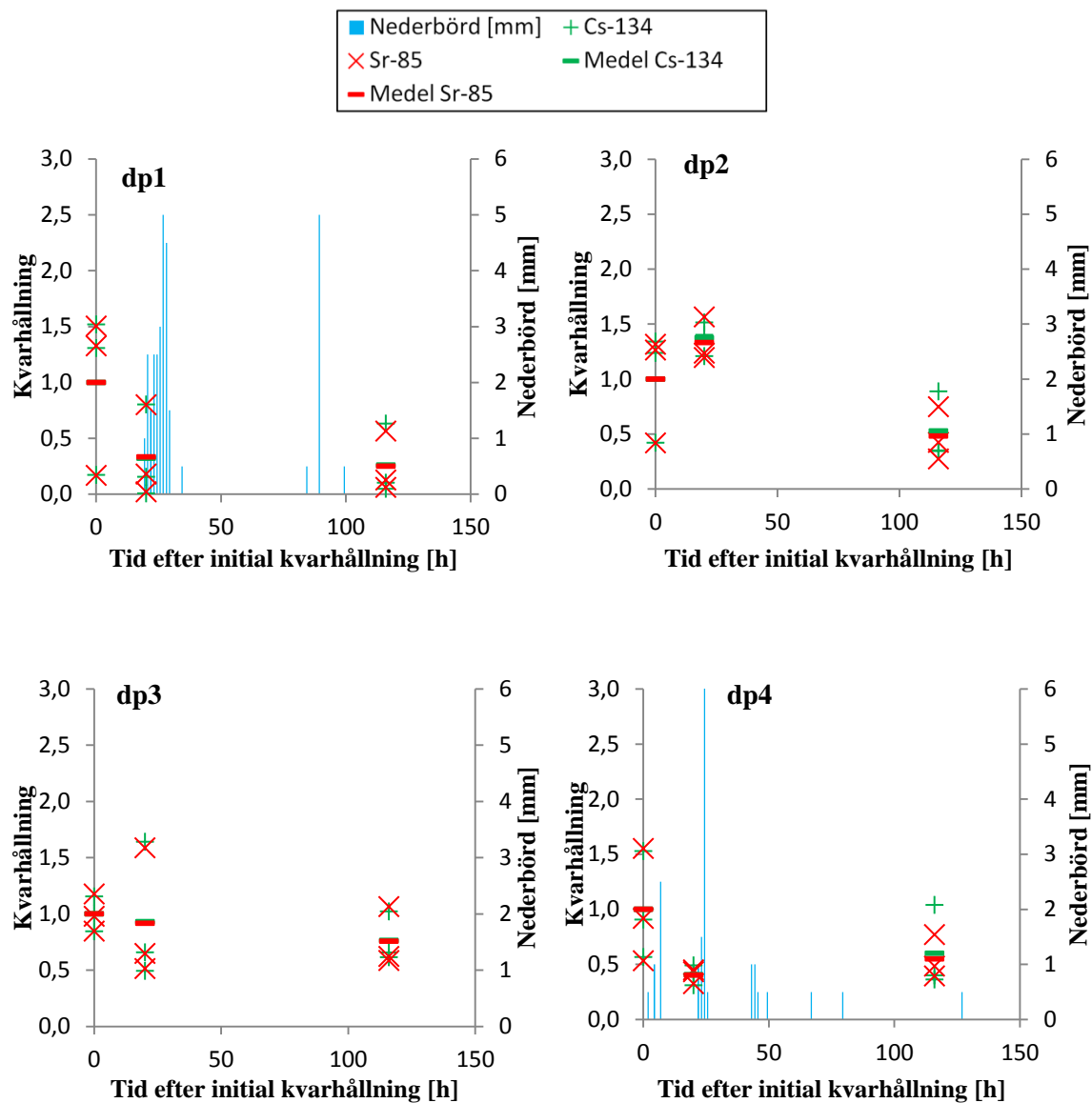
**Figur 15** Den vänstra y-axeln visar kvarhållningen för vall i de olika växtutvecklingsstadierna. Den högra y-axeln visar nederbörden och på x-axeln visas tiden efter den initiala kvarhållningen.

Det var svårt att se någon trend för kvarhållningen hos vall. Vid tre tillfällen ökade kvarhållningen efter ett dygn för att sedan minska och vid ett tillfälle minskade kvarhållningen successivt (figur 15). Nederbörden verkade inte ha någon betydelse och ingen betydelsefull skillnad mellan  $^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$  observerades.



**Figur 16** Den vänstra y-axeln visar kvarhållningen för vall i de olika växtutvecklingsstadierna. Den högra y-axeln visar nederbörden och på x-axeln visas tiden efter den initiala kvarhållningen.

Kvarhållningen hos vete minskade efter ett dygn vid alla deponeringstillfällen, dock skedde en ökning efter fem dygn vid tre tillfällen, se figur 16. Vid två av dessa tillfällen var ökningen så pass kraftig att kvarhållningen översteg den initiala uppfångningen, vilket i teorin är omöjligt. Nederbörd förekom endast vid ett av tillfällena och vid detta tillfälle var minskningen av kvarhållningen som störst. Ingen betydelsefull skillnad mellan  $^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$  observerades.



**Figur 17** Den vänstra y-axeln visar kvarhållningen för vall i de olika växtutvecklingsstadierna. Den högra y-axeln visar nederbörden och på x-axeln visas tiden efter den initiala kvarhållningen.

En minskning av kvarhållningen skedde efter ett dygn vid tre tillfällen och vid två av dessa fortsatte minskningen fram till fem dygn, se figur 17. Nederbörd förekom vid två tillfällen och störst minskning av kvarhållningen skedde vid dessa tillfällen (dp1 och dp4). För dp1 ser det ut som att det regnade vid den andra provtagningen vilket det inte gjorde. Anledningen till att det ser ut så i figuren är att tidpunkter för provtagning är uppskattade värden och inte exakta tidpunkter. För att förenkla antogs att alla provtagningar ägde rum 15.00. Liksom för vall och vete syntes ingen betydelsefull skillnad mellan  $^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$ .

## 5 DISKUSSION

### 5.1 BIOMASSA OCH LAI

För vall skedde en ökning av både biomassa och LAI till andra deponeringstillfället, därefter en minskning eftersom växterna slogs av. Fram till den fjärde deponeringen skedde återigen en ökning. Denna ökning var dock mindre än den första ökningen som skedde. Detta berodde troligen på att första skörden var större, vilket är det normala till följd av mer näring och ljus i början av växtsäsongen. För både vete och raps ökade biomassan och LAI fram till tredje deponeringstillfället för att sedan minska något, se tabell 6. LAI för raps minskade betydligt mer vilket förmodligen beror på att raps har stora blad som fälls i slutet av växtsäsongen och därmed sker en stor förändring. Om man tittar på LAI för vete var det lägst vid det tredje utvecklingsstadiet trots att biomassan var störst där. I tabell 6 visas endast ett medelvärde för LAI, men standardavvikelsen var låg (0,13). Detta tyder på ett systematiskt mätfel, förmodligen blev något fel vid mätningarna av LAI. I figur 6, se sektion 3.1.3, syns det att växterna har blad som verkar ha en bladarea större än vid tidigare deponeringstillfälle. Samma sak observerades i fält vid deponeringstillfället. Detta stödjer teorin om att något har blivit fel vid mätning av LAI.

I detta arbete hade vete ett maximum för biomassan på  $0,67 \text{ kg/m}^2$  och för LAI var maximum 1,36. För raps, som uppvisade det högsta värdet för LAI, var maximum 3,06. Värdena kan jämföras med resultat från en studie utförd av Vandecasteele m.fl. (2001) där aerosoler av  $^{137}\text{Cs}$  och  $^{90}\text{Sr}$  deponerades på vårvete i växthus. De erhöll en ökning av biomassan med tiden och LAI ökade fram till näst sista deponeringstillfälle för att sedan minska. Deras värden för LAI och biomassa var betydligt högre jämfört med värden i detta arbete, de fick ett maximum för LAI på 7,54 och maximum i biomassan var ungefär  $1,2 \text{ kg/m}^2$ . Skillnaden kan bero på att Vandecasteele m.fl. (2001) har utfört sin studie i växthus och därmed fått en bättre och mer jämn tillväxt. De kan dessutom ha utfört mätningarna av LAI annorlunda och med ett annat instrument.

Resultaten i detta arbete tyder på ett polynomiskt samband mellan biomassa och LAI för vall, raps och vete, se figur 11. Sambanden för vall och raps är statistiskt signifikanta med 95 % säkerhet. För raps är sambandet inte statistiskt signifikant. De polynomiska sambanden kan förklaras med att biomassan minskar mindre än LAI eftersom växtens blad dör och fälls i slutet av växtsäsongen medan tillväxt av frön och lagringsorgan höjer biomassan (Pröhl, 2009). Vandecasteele m.fl. (2001) har fått ett liknande samband för vete, dock med endast sju mätvärden. För raps är sambandet inte statistiskt signifikant vilket kan bero på att biomassan har stor spridning till följd av variation i växtutvecklingen mellan de olika försöksrutorna. I denna studie verkar det som att LAI för vall inte minskar lika mycket som för raps och vete vilket kan tyda på att bladen hos vall inte fälls i lika stor utsträckning.

## 5.2 UPPFÅNGNING

Uppfångningen för vete var betydligt lägre än den för vall och raps, se tabell 7. Det kan förklaras med att vete även hade en lägre biomassa och ett lägre LAI. Detta leder till att bladen täcker en mindre del av markytan. Därmed hamnar en mindre andel av nedfallet på växten, som av den anledningen inte kan fånga in så mycket radionuklider (Andersson m.fl., 2002; Rosén & Eriksson, 2008). Bladens form är även annorlunda, särskilt i jämförelse med raps. Vete deponerades alltid samtidigt som minst en av de andra grödorna och därmed under samma väderförhållanden. Vindhastighet och temperatur borde därför inte ha någon större betydelse för de låga värdena.

Maximumvärden för uppfångningsfraktionen var 0,39 och 0,44 för  $^{134}\text{Cs}$  respektive  $^{85}\text{Sr}$  för vall, 0,11 för båda radionukliderna för vete och 0,37 och 0,39 för  $^{134}\text{Cs}$  respektive  $^{85}\text{Sr}$  för raps, se tabell 7. Även här har Vandercasteele m.fl. (2001) fått betydligt högre värden, 0,84 som högst för  $^{134}\text{Cs}$  och 0,88 som högst för  $^{85}\text{Sr}$ . Detta kan delvis förklaras med att högre LAI och högre biomassa leder till att bladen täcker en större del av marken och kan fånga upp en större andel av radionukliderna. Enligt Nimis (1996) uppskattas ofta uppfångningsfraktionen för jordbrukssystem till 0,2-0,25 vilket stämmer bra med de värden mellan 0,01 – 0,39 som erhållits i detta arbete, se tabell 7.

För vall kan ett linjärt samband mellan biomassa och  $f$  påvisas medan raps och vete har logaritmiska samband, se figur 12, där  $f$  ökar med biomassan och ökningen sedan avtar med tiden. Alla samband är statistiskt signifikanta med 95 % säkerhet. Anledningen till att vall har ett linjärt samband är förmodligen för att växterna skördades två gånger. Vandercasteele m.fl. (2001) har fått ett liknande samband för vete som det som erhöles i detta arbete för både raps och vete.

Enligt Pröhl (2009) ökar uppfångningsfraktionen med bladytans utvecklingsgrad vilken kan uttryckas i växtens biomassa per markarea eller i LAI. LAI anses ha bäst korrelation med bladytan under alla växtutvecklingsstadier. LAI har ett logaritmiskt samband med uppfångningen för  $^{137}\text{Cs}$  med  $R^2$ -värdet 0,8 (Pröhl, 2009). I denna studie är sambandet för LAI är svagare, med  $R^2$ -värden på ungefär 0,4 för alla växterna och båda radionukliderna, se figur 13. Sambanden mellan LAI och  $f$  är dessutom endast statistiskt signifikant för vall. För vall och vete är sambandet linjärt medan det är logaritmiskt för raps. Detta beror antagligen på att vall skördades två gånger och för vete fick flera värden för LAI uteslutas vilket resulterade i osäkerheter. Vandercasteele m.fl. (2001) visade logaritmiska samband mellan LAI och  $f$ , dock med betydligt större  $R^2$ -värde. Detta beror antagligen på att de gjorde växthusförsök och därmed fick mindre variation i sina mätvärden.

För uppfångningen och växtutvecklingsstadiet kan ett samband påvisas. Både vete och raps hade störst uppfångning vid det tredje utvecklingsstadiet, se figur 14. Det beror på att växtutvecklingen påverkar LAI och biomassa för växten. För både vall och raps var LAI högst då uppfångningen är som störst, vilket var vid andra deponeringstillfället för vall och tredje för raps. Eftersom mätvärden för LAI hos vete vid det tredje deponeringstillfället antagligen är felaktiga är det svårt att se något samband där.

### 5.2.1 Jämförelse mellan uppfångningen av $^{134}\text{Cs}$ och $^{85}\text{Sr}$

Eftersom bivalenta joner som strontium fångas upp mer effektivt av den negativt laddade växtytan jämfört med monovalenta joner som cesium (Pröhl, 2009) borde uppfångningsfraktionerna för strontium vara högre än de för cesium. Detta är något som Vandecasteele m.fl. (2001) påvisade i sin studie. I detta examensarbete ligger uppfångningsfraktionerna för  $^{85}\text{Sr}$  generellt lite högre än de för  $^{134}\text{Cs}$  när det gäller vall och raps, men för vete går det inte att se någon tydlig skillnad, se figur 14. Detta kan bero på att mätvärdena för vete ligger mycket lägre än de för vall och raps. I och med detta kan slutsatsen dras att uppfångningen av såväl  $^{134}\text{Cs}$  som  $^{85}\text{Sr}$ , i denna studie, är relaterad till mängden vatten och därmed radioaktiviteten som når växterna. Kemiska processer som sker vid växtytan verkar inte ha någon större betydelse för uppfångningsfraktionens storlek.

Vindhastighet och temperatur vid de olika deponeringstillfällena har små variationer och det är därför svårt att säga något om dess påverkan, se tabell 7. Vindhastigheterna var relativt låga och bör därför inte ha påverkat uppfångningen nämnvärt.

### 5.3 KVARHÅLLNING

Kvarhållningen kan, enligt definitionen som används i denna studie, teoretiskt sett inte blir större än 1 eftersom det skulle betyda att aktiviteten har ökat efter den första provtagningen. Detta skulle tyda på ett orimligt snabbt upptag via rötterna. Fältförluster borde leda till att kvarhållningen minskar med tiden (Chadwick & Chamberlain, 1970). I detta försök låg dock ett flertal värden för kvarhållningen över 1. Det beror antagligen på osäkerheter vid provtagning och heterogenitet mellan de olika försöksrutorna. Dessutom var standardavvikelsen för medelvärdena stor. I detta sammanhang är det viktigt att uppmärksamma att det inte är samma ruta som har provtagits ett och fem dygn senare. För varje provtagningstillfälle användes en ny ruta. På grund av variationer mellan försöksrutorna kan en variation mellan mätvärden förekomma. Dessutom kan det vara så att rutan som provtogs ett eller fem dygn senare hade en högre initial uppfångning jämfört med de rutor som provtogs ungefär fyra timmar efter deponering och användes som referens. Därmed kan kvarhållningen bli något större än 1 utan att något behöver vara fel med provtagning och mätning. I några fall var dock kvarhållningsfaktorerna så pass mycket större än 1 att dessa resultat bör betraktas som felaktiga.

Om man tittar på figur 15, 16 och 17, och bortser från värden som verkar orimliga, syns en trend som tyder på att kvarhållningen minskar med tiden. Minskningen från ett till fem dygn efter deponering verkar vara mindre än minskningen från deponeringsdagen till ett dygn efter. Detta tyder på att kvarhållningen minskade mest första dygnet efter deponering. Enligt Chamberlain (1970) minskar aktiviteten i växter genom processer som avdunstning, lakning av regn, avlägsnande av partiklar genom regn eller vind, avdöende eller vittring av blad eller bladytor. Avdunstning kan vara en viktig faktor, men endast i varma klimat. Efter Windscaleolyckan i England, i oktober 1957, kunde ingen avdunstning av jod, som deponerats, påvisas i luften. Eftersom olyckan skedde i oktober var temperaturen antagligen lägre än den temperatur som uppmättes vid

deponeringarna i detta examensarbete under sommaren 2011. Därmed kan avdunstning ha förekommit, men det var antagligen en mindre betydande faktor.

Det är svårt att säga något om nederbördens inverkan, men för raps verkar nederbörden ge en lägre kvarhållning. Vandecasteele m.fl. (2001) applicerade simulerat regn sex dagar efter deponering och ungefär fyra gånger så mycket  $^{137}\text{Cs}$  som  $^{90}\text{Sr}$  avlägsnades vid första applikationen. Vid skörd fanns ungefär 2 % av det strontium som initialt fångats upp av växten vid ett tidigt utvecklingsstadium kvar och 1 % av cesiumet. En större andel cesium och strontium fanns kvar i växten vid skörd då deponeringen skett vid senare utvecklingsstadium. I detta försök är det svårt att se någon skillnad i kvarhållningen mellan de olika utvecklingsstadierna, på grund av att variationen i mätvärden var så stor.

### 5.3.1 Jämförelse mellan kvarhållningen av $^{134}\text{Cs}$ och $^{85}\text{Sr}$

För kvarhållningen syntes ingen betydande skillnad mellan  $^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$  oavsett växt och tidpunkt efter första provtagningen. I försöket där Vandecasteele m.fl. (2001) applicerade simulerat regn sex dagar efter deponering avlägsnades ungefär fyra gånger så mycket  $^{137}\text{Cs}$  som  $^{90}\text{Sr}$ . Detta kan bero på att strontium är en bivalent jon, medan cesium är en monovalent jon, vilket innebär att strontium hålls starkare till växten (Pröhl, 2009). Dessutom har monovalenta joner som cesium en högre rörlighet vid och efter upptag os växter (Eriksson & Rosén, 2000). Anledningen till att ingen skillnad kunde påvisas i detta försök kan vara variationen mellan mätvärdena. Dessutom har nederbörd inte förekommit efter alla deponeringsprocesser. Det kan alltså vara andra faktorer som har avlägsnat ungefär lika mycket  $^{134}\text{Cs}$  som  $^{85}\text{Sr}$ . Vandecasteele m.fl. deponerade en högre aktivitet, mellan 7,1 och 32,3 MBq/m<sup>2</sup> jämfört med ungefär 40 kBq/m<sup>2</sup> i denna studie. Detta kan möjligtvis innebära att nuklider som fångas upp ligger kvar på växtens ytor i större utsträckning än i detta arbete.

## 5.3 MOTÅTGÄRDER

Resultatet från detta försök har visat att uppfångningen är störst vid degmognad för vete, vid fröutveckling för raps och vid blomning för vall. Detta tyder på att det är vid dessa utvecklingsstadier som det är viktigaste att använda sig av motåtgärder. Om det radioaktiva nedfallet kommer i ett utvecklingsstadium där växterna inte har en hög uppfångningsfraktion kan senareläggning av skörden vara tillräckligt som motåtgärd eftersom radioaktiviteten minskar med tiden (Andersson m.fl., 2002). Dessutom tyder resultaten i detta arbete på att nederbörd kan minska radioaktiviteten.

Denna studie har även visat att en minskning av kvarhållningen sker redan det första dygnet efter deponering. Detta innebär att växter bör slås av så fort som möjligt för att undvika kontaminering av jorden (Rosén & Eriksson, 2008). Dock har försöket utförts på lerjord som kan fixera cesium vilket leder till ett lägre upptag hos växten (Shaw & Bell, 1998; Andersson m.fl., 2002). Därmed kan det vara så att kontaminering av jorden inte är en stor risk, men om grödorna ändå ska slås av är det bäst att göra det så fort som möjligt.

Vete har en betydligt lägre uppfångning än raps och vall vilket tyder på att motåtgärder för de senare grödorna är viktigare. Dock är det den totala radioaktiviteten i nedfallet som avgör. Om denna är mycket hög kan vete ändå ta upp tillräckligt med radioaktiva ämnen för att bli så pass kontaminerat att gränsvärden överskrids.

Resultaten från denna studie tyder på att biomassan har ett starkare samband med uppfångningsfraktionen jämfört med LAI och passar därmed bättre för uppskattningar av grödornas uppfångning av radionuklider .

Resultatet från detta försök kan användas i modeller för att bestämma vilka motåtgärder som passar bäst vid olika tillfällen.

## 5.4 FELKÄLLOR

Detta examensarbete är utformat som ett fältförsök vilket medför en del faktorer som inte går och/eller är svåra att kontrollera. För både vete och raps var variationen i biomassa och växtutveckling mellan försöksrutorna stor i början av växtsäsongen, se figur 18. Detta ledde till variationer i uppfångningen. Vete och raps växte dåligt i början av säsongen och hade därför vid provtagning låga värden för biomassa och LAI jämfört med vad som förväntades. Vete växte så pass dåligt att vi blev tvungna att flytta en del av försöksrutorna till nya rutor. Variationer i väderförhållanden vid deponering är en annan faktor som inte kan påverkas, däremot valdes deponeringstillfällen utifrån väderprognoser. Mestadels utfördes deponeringar vid uppehållsväder, men vid ett tillfälle regnade det strax efter deponering. Detta kan ha lett till en minskad uppfångning eftersom radionukliderna kan sköljas av växterna med regnet. Vid deponering användes en regnsimulator som var inställd på att ge 0,36 L jämnfördelat per försöksruta, men osäkerheter kan ha lett till att de olika rutorna inte fick exakt samma aktivitet och att den deponerade mängden inte fördelades jämnt över deponeringsytan. Vid provtagningen användes en ram av ståltråd som var 25 x 25 cm för att lättare provta rätt yta. Dock var det svårt att avgöra hur mycket av växten som var innanför ramen, särskilt för höga växter, vilket ledde till att osäkerheten blev stor vid detta moment. Om en för stor eller för liten yta provtas påverkas uppfångningsfraktionens värde eftersom aktiviteter i [ $\text{Bq}/\text{m}^2$ ] används för att beräkna dem. LAI är svårt att mäta. Instrumentet ska helst hållas helt horisontellt vilket är svårt och variationer av vädret, t.ex. varierad molnighet, under mätningen påverkar resultatet. Vid mätning av provernas aktivitet har mätfelet varit  $< 5 \%$ . Uppskattningen av burkens fyllnadsgrad ger osäkerheter, dock har de flesta burkar varit fyllda till 100 %. Vid deponering, provtagning och malning av prover finns en risk för kontaminering från andra prover vilket kan påverka aktivitetens och därmed uppfångningsfraktionens värden.





**Figur 18** Figuren visar variationer i biomassa, LAI och växtutveckling mellan de olika rutorna för raps. Bilderna är tagna vid det första deponeringstillfället.

## 6 SLUTSATSER

- Uppfångningsfraktionen för vete var betydligt lägre än den för vall och raps. Maximum var för vall 0,39 för  $^{134}\text{Cs}$  och 0,44 för  $^{85}\text{Sr}$ , för vete 0,11 för båda radionukliderna och för raps 0,37 för  $^{134}\text{Cs}$  och 0,39 för  $^{85}\text{Sr}$ .
- Vall och raps hade en något högre uppfångningsfraktion för  $^{85}\text{Sr}$  jämfört med  $^{134}\text{Cs}$  vid samtliga växtutvecklingsstadier.
- Hos både vete och raps var uppfångningen störst vid det tredje utvecklingsstadiet, degmognad respektive fröutveckling, och för vall var den störst vid andra utvecklingsstadiet, blomning. För både vall och raps sammanträffade detta med högsta värdet för LAI. För vete var det problem med mätning av LAI vid detta tillfälle.
- Mellan biomassan och uppfångningsfraktionen fanns ett positivt samband som var statistiskt signifikant för alla växter. För LAI och uppfångningsfraktionen var sambandet inte signifikant mer än för vall.
- Kvarhållningen visade en svag tendens att minska med tiden, minskningen var störst under det första dygnet efter uppfångningen. Dock var standardavvikelsen stor och värden därmed osäkra.

## 7 REFERENSER

Aarkrog, A. (2001). Manmade radioactivity. i E. V. Stricht, & R. Kirchmann (Red.), *Radioecology: Radioactivity and Ecosystems* (ss. 55-75). Liège, Belgium: Fortemps.

Aarkrog, A. (1969). On the direct contamination of rye, barley, wheat and oats with <sup>85</sup>Sr, <sup>134</sup>Cs, <sup>54</sup>Mn and <sup>141</sup>Ce. *Radiation Botany*, 9, 357-366.

Alexakhin, A., Cigna, A., & Kirchmann, R. (2001). A brief historical perspective. i E. V. Stricht, & R. Kirchmann (Red.), *Radioecology: Radioactivity and Ecosystems* (ss. 1-10). Liège, Belgium: Fortemps.

Anderberg, A. (den 7 juli 2008). *Raps*. Hämtat från Den virtuella floran: <http://linnaeus.nrm.se/flora/di/brassica/brass/brasnap.html> den 26 augusti 2011

Anderberg, A. (den 22 februari 2010). *Vete*. Hämtat från Den virtuella floran: <http://linnaeus.nrm.se/flora/mono/poa/triti/tritaes.html> den 26 augusti 2011

Andersson, I., Bergman, R., Enander, A., Finck, R., Johansson, K. J., Nylén, T., o.a. (2002). *Livsmedelsproduktionen vid nedfall av radioaktiva ämnen*. (K. Persson, & J. Preuthun, Red.) Edita.

Andersson, I., Bergman, R., Enander, A., Finck, R., Johansson, K. J., Nylén, T., o.a. (2002). *Livsmedelsproduktionen vid nedfall av radioaktiva ämnen*. (K. Persson, & J. Preuthun, Red.) Västra Aros: Edita.

Bergman, C., Johansson, K.-J., Karlberg, J., Larsson, B., Lundqvist, H., Löfroth, P.-O., o.a. (1994). *Strålskydd*. (L.-T. Jansson, & B.-E. Rydén, Red.) Borås: Natur och Kultur.

Bunzl, K., Schimmack, K., & Kreutzer, K. S. (1989). Interception and retention of chernobyl-derived <sup>134</sup>-Cs, <sup>137</sup>-Cs and <sup>106</sup>-Ru in a spruce stand. *Science of The Total Environment*, 78, 77-87.

Canberra. (2010). *Gamma and X-ray Detection*. Meriden: Canberra Industries.

Carini, F., Brambilla, N., Mitchell, N., & Ould-Dada, Z. (2003). Cesium-134 and Strontium-85 in Strawberry Plants following Wet Aerial Deposition. *Journal of Environmental Quality*, 32, 2254-2264.

Chadwick, R. C., & Chamberlain, A. C. (1970). Field loss of radionuclides from grass. *Atmospheric Environment*, 4, 51-56.

Chamberlain, A. C. (1970). Interception and retention of radioactive aerosols by vegetation. *Atmospheric Environment*, 4, 57-78.

Choppin, G. R., Liljenzin, J.-O., & Rydberg, J. (2002). Unstable Nuclei and Radioactive Decay. i G. R. Choppin, J.-O. Liljenzin, & J. Rydberg, *Radiochemistry and Nuclear Chemistry* (Third uppl., ss. 79-80). Woburn: Butterworth-Heinemann.

- Choppin, G., Liljenzin, J.-O., & Rydberg, J. (2002). Detection and Measurement Techniques. i G. Choppin, J.-O. Liljenzin, & J. Rydberg, *Radiochemistry and Nuclear Chemistry* (Third uppl., ss. 192-213). Woburn: Butterworth-Heinemann.
- Eriksson, Å., & Rosén, K. (2000). Naturlig radioaktivitet i svenska odlade jordar och grödor. *Kungl. Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift*, 139.
- Hoffman, F. O., Thiessen, K. M., & Rael, R. M. (1995). Comparison of interception and initial retention of wet-deposited leaves of different vegetation types. *Atmospheric Environment*, 26 (15), 1771-1775.
- IAEA. (2011). *IAEA International fact finding expert mission of the Fukushima Dai-ichi NPP accident following the great east Japan earthquake and tsunami*. Tokyo, Fukushima Dai-ichi NPP, Fukushima Dai-ni NPP and Tokai Dai-ni NPP: IAEA.
- IAEA. (2008). *Nuclear Technology Review 2008*. Vienna: IAEA.
- Joel, A., & Messing, I. (2001). Infiltration Rate and Hydraulic Conductivity Measured with Rain Simulator and Disc Permeameter on Sloping Arid Land. *Arid Land Research and Management*, 15 (4), 371-384.
- Johansson, K. J. (1996). *Strålning Människan och Miljön*. Uppsala: Sveriges Lantbruksuniversitet.
- Jordbruksverket. (den 21 januari 2011). *Veteodling*. Hämtat från Jordbruksverket: <http://www.jordbruksverket.se/amnesomraden/odling/spannmalsgrodor/vete.4.32b12c7f12940112a7c800020218.html> den 10 augusti 2011
- Knoll, G. F. (2000). General Properties of Radiation Detectors. i *Radiation Detection and Measurement* (third uppl., ss. 103-127). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Knoll, G. F. (2000). Germanium Gamma-Ray Detectors. i *Radiation Detection and Measurement* (third uppl., ss. 405-453). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Knoll, G. F. (2000). Semiconductor Diode Detectors. i *Radiation Detection and Measurement* (third uppl., ss. 353-400). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Knoll, G. F. (2000). The multichannel Analyzer. i G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement* (third uppl., ss. 691-693). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Leclerc, E., Colle, C., Madoz-Escande, C., & Choi, Y. H. (2009). *Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments*. Vienna: IAEA.
- Lehto, J., & Hou, X. (2010). *Chemistry and Analysis of Radionuclides*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH.

- Livsmedelsverket. (den 16 november 2010). *Radioaktiva ämnen*. Hämtat från Livsmedelsverket: <http://www.slv.se/sv/grupp1/Risker-med-mat/Radioaktivitet-och-bestraling/Radioaktiva-amnen/> den 10 augusti 2011
- LRF. (2009). *Vall - inte bara dinosaurieägg som syns*. Hämtat från Lantbrukarnas riksförbund: <http://www.lrf.se/Garden/Odling/Vaxtodling/Vall/> den 26 augusti 2011
- Madoz-Escande, C., Garcia-Sanchez, L., Bonhomme, T., & Morello, M. (2005). Influence of rainfall characteristics on elimination of aerosols of cesium, strontium, barium and tellurium deposited in grassland. *Journal of Environmental Radioactivity* , 1-20.
- Magill, J., & Galy, J. (2005). Origins and Discovery. i J. Magill, & J. Galy, *Radioactivity Radionuclides Radiation* (ss. 5-6). Karlsruhe: Springer.
- Magill, J., & Galy, J. (2005). Types of Radioactive Decay. i J. Magill, & J. Galy, *Radioactivity Radionuclides Radiation* (ss. 60-71). Karlsruhe: Springer.
- Moberg, L. (2006). Det största kärnkraftshaveriet. *Strålskyddsnytt* , 10-11.
- Moberg, L. (2001). *Kärnkraftsolyckan i Tjernobyl: En sammanfattning femton år efter olyckan*. Stockholm: Statens Strålskyddsinstitut.
- Nimis, P. L. (1996). Radiocaesium in plants of forest ecosystems. *Studia Geobotanica* , 15 (3-49), 3-38.
- Nordling, C., & Österman, J. (2006). *Physics handbook* (Eight uppl.). Lund: Studentlitteratur.
- Pattenden, N. (2001). Natural radioactivity. i E. v. Stricht, & R. Kirchmann (Red.), *Radioecology: Radioactivity & Ecosystems* (ss. 43-50). Liège, Belgium: Fortemps.
- Petroff, A., Mailliat, A., Amielh, M., & Anselmet, F. (2008). Aerosol dry deposition on vegetative canopies. Part I: Review of present knowledge. *Atmospheric Environment* , 3625-3653.
- Pröhl, G. (2009). Interception of dry and wet deposited radionuclides by vegetation. *Journal of Environmental Radioactivity* , 675-682.
- Pröhl, G. (2009). Interception of dry and wet deposited radionuclides by vegetation. *Journal of Environmental Radioactivity* , 675-682.
- Rosén, K., & Eriksson, J. (2008). *Motåtgärder i växtodlingen efter ett nedfall av radioaktivt cesium vid olika nedfallsnivåer och årstider*. Jönköping: Jordbruksverket.
- SGAB. (1986). *Map of Cs-137, k Bq m2, ground surface results from aerial surveys, May-October 1986*. Uppsala: Swedish Geological Company.

Shaw, G., & Bell, J. (1998). Transfer in Agricultural Soil-Plant Systems. i E. Van der Stricht, & R. Kirchmann (Red.), *Radioecology: Radioactivity and Ecosystems* (ss. 118-123). Liège: Fortemps.

Smith, F. (1998). Atmospheric dispersion and deposition. i E. Van der Stricht, & R. Kirchmann (Red.), *Radioecology: Radioactivity and Ecosystems* (ss. 84-85). Liège: Fortemps.

Strålsäkerhetsmyndigheten. (den 13 april 2011). *Frågor och svar om strålning*. Hämtat från Strålsäkerhetsmyndigheten: <http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Om-myndigheten/Aktuellt---Bilagor/Fragor-och-svar-om-stralning/> den 11 augusti 2011

Strålsäkerhetsmyndigheten. (den 28 januari 2011). *INES-skalan*. Hämtat från Strålsäkerhetsmyndigheten: <http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Allmanhet/Om-stralning/INES-skalan/> den 29 augusti 2011

Strålsäkerhetsmyndigheten. (den 7 Juli 2010). *Joniserande Strålning*. Hämtat från Strålsäkerhetsmyndigheten: <http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Allmanhet/Om-stralning/Joniserande-stralning/> den 9 Augusti 2011

Vandecasteele, C. M., Baker, S., H, F., Muzinsky, M., Millan, R., Madoz-Escande, C., et al. (2001). Interception, retention and translocation under greenhouse conditions of radiocaesium and radiostrontium from a simulated accidental source. *The Science of the Total Environment* (278), 199-214.

# BILAGOR

## BILAGA 1 Försöksrutornas placering

Figur B1 visar en schematisk skiss över försöksfältet och försöksrutorna och blockens placering.

Dag Hammarskjölds väg									
Vete Block 4		Block 5		Block 6		Raps Block 7		Block 8	
49	58	74	68	86	91	112	104	118	120
54	62	67	76	93	95	97	98	121	122
63	50	66	80	90	94	110	100	126	123
61	60	72	73	84	88	105	109	114	119
57	59	70	78	83	89	108	103	128	127
55	53	71	75	92	82	102	99	115	116
64	51	79	69	85	96	101	107	117	113
52	56	77	65	81	87	111	106	125	124
50	60	59	80	73	78	94	88	89	
63	61	57	66	72	70	90	84	83	
58	62			68	76		91	95	
49	54			74	67		86	93	
Vall Block 1		Block 2		Block 3					
9	5	17	28	39	37				
10	13	27	31	36	44				
7	12	32	18	46	45				
15	3	23	30	48	38				
16	11	22	21	42	40				
2	4	20	29	41	34				
6	14	25	19	33	43				
8	1	24	26	35	47				

**Figur B1** Skiss över blockens och rutornas placering på försöksfältet, gula, gröna och rosa rutor i var de som flyttades från block 4, 5 och 6 till de två blocken nedanför på grund av att tillväxten var dålig.

## BILAGA 2 Mätvärden - vikt, LAI och aktivitet

Tabell B1, B2 och B3 innehåller mätvärden för färskvikt, torrsvikt, burkvikt, LAI och aktivitet, i Bq/kg som är den enhet som fås efter mätning med detektorn, för vall, vete och raps. I tabell B1 saknas mätvärden för försöksruta A34 eftersom det blev fel med deponeringen där, dessutom saknas värden för LAI för ruta A2 och A19. Rutnummer markerad med K är kontrollrutor.

**Tabell B1** Vikter, LAI och aktivitet för vall.

Rutnr	Datum	Färskvikt [g]	Torrsvikt [g]	Burkvikt [g]	LAI	<sup>134</sup> Cs[Bq/kg]	<sup>85</sup> Sr [Bq/kg]
A1	26-maj	65,6	11	5,91	1,22	41200	42600
A2	27-maj	147,25	46,49	11,36	-	20600	22800
A3	31-maj	6,05	1,7	1,6	1,06	4615	4586
A17	26-maj	47	12,51	9,35	0,66	18500	19900
A18	27-maj	10,97	7,71	4,86	0,76	23700	24300
A19	31-maj	142,43	23,9	17,2	-	24700	24000
A33	26-maj	31	6,68	5,18	1,41	40100	44100
A34	27-maj	-	-	-	-	-	-
A35	31-maj	8,39	1,7	1,6	0,26	33913	39075
A13K	26-maj	149,5	31,6	15,9	1,79	81	143
A29K	26-maj	27,6	6,8	5,1	1,84	32	36
A45K	26-maj	25,9	7,6	5,8	0,56	489	197
A4	16-jun	175	46	16,1	3,05	23600	25200
A5	17-jun	121	36,7	17,3	2,14	37200	40600
A6	21-jun	247,4	72,8	14,6	2,92	10600	11500
A20	16-jun	141,8	43,1	13,7	2,85	30800	35400
A21	17-jun	37,3	9	7,7	2,1	30400	33200
A22	21-jun	102,8	29	15,7	2,59	29500	31100
A36	16-jun	83,1	25,2	17,7	1,94	20200	25100
A37	17-jun	116,4	29,7	14,6	1,51	15300	17500
A38	21-jun	47,8	18,1	14,9	2,07	8050	7890
A14K	16-jun	197,1	50,3	16,7	3,95	199	390
A30K	16-jun	86,4	25,7	15,6	2,32	139	197
A46K	16-jun	57,4	14,3	12,4	2,17	93	116
A7	08-aug	7,05	1,96	1,75	1,15	42400	42100
A8	09-aug	53,66	7,89	7,21	2,27	40900	47300
A9	13-aug	27,19	6,8	5,45	1,19	21600	22200
A23	08-aug	49,64	14,59	10,56	1,97	25300	28000
A24	09-aug	63,87	16	9,84	2,82	24400	26400
A25	13-aug	43,63	10,72	9,74	2,26	22400	23700
A39	08-aug	32,6	9,58	8,54	1,47	28300	30300
A40	09-aug	32,8	9,18	7,38	2,5	28600	30500
A41	13-aug	64,54	16,65	14,3	2,87	25100	27400
A15K	08-aug	23,75	4,91	4,32	1,22	99	135



A31K	08-aug	30,24	9,46	8,02	1,91	169	254
A47K	08-aug	43,74	12,88	9,61	2,91	92	123
A10	01-sep	96,12	15,65	12,55	2,66	18000	25700
A11	02-sep	97,54	17,77	14,02	2,97	16800	24600
A12	06-sep	29,96	8,05	7,54	2,63	14900	21400
A26	01-sep	46,23	7,53	6,5	2,1	14400	21200
A27	02-sep	87,56	29,9	13,95	2,64	18000	24500
A28	06-sep	63,4	16,65	13,83	1,89	10900	16400
A42	01-sep	62,58	14,37	12,04	2,64	21600	28800
A43	02-sep	62,12	10,74	9,04	2,31	21700	29100
A44	06-sep	82,99	24,67	12,81	2,73	12900	21500
A16K	01-sep	62,41	8,3	7,2	2,35	52	94
A32K	01-sep	47,45	9,05	8,73	2,23	41	66
A48K	01-sep	54,21	9,78	8,78	2,1	79	132

**Tabell B2** Vikter, LAI och aktivitet för vete.

Rutnr	Datum	Färskvikt [g]	Torrsvikt [g]	Burkviktt [g]	LAI	<sup>134</sup> Cs[Bq/kg]	<sup>85</sup> Sr [Bq/kg]
A49	22-jun	4,8	1,8	1,15	0,15	7140	9580
A50	23-jun	6,8	1,39	1,09	0,25	2370	3670
A51	27-jun	21,8	5,34	5,02	0,58	1540	2090
A65	22-jun	5,9	2,05	1,43	0,37	15000	18000
A66	23-jun	11,2	2,54	1,83	0,25	3	3
A67	27-jun	17,9	5,15	4,63	0,39	1520	1800
A81	22-jun	7,4	2,25	1,56	0,62	14700	17900
A82	23-jun	11,1	2,1	1,76	0,27	5090	7400
A83	27-jun	12,1	3,26	2,75	0,22	1480	2200
A61K	22-jun	1,3	0,97	0,25	0,07	0	0
A77K	22-jun	2,7	1,29	0,75	0,3	552	670
A93K	22-jun	2,9	1,35	0,87	0,22	514	671
A52	07-jul	63	14,61	11,99	1,53	10500	10000
A53	08-jul	67,3	15,44	11,27	1,01	9850	9910
A54	12-jul	39,3	11,91	10,9	0,71	4510	4670
A68	07-jul	73,5	19,94	12,51	1,63	14400	13800
A69	08-jul	56,1	12,97	11,27	1,11	11600	11800
A70	12-jul	33,7	9,55	7,16	0,92	11900	12500
A84	07-jul	64,7	14,83	11,41	1,8	7790	7890
A85	08-jul	77,6	17,84	12,51	1,67	11600	11200
A86	12-jul	73,7	18,61	13,89	1,78	6020	5790
A62K	07-jul	16,4	4,57	3,9	1,02	30	80
A78K	07-jul	58,5	15,52	12,84	1	38	66
A94K	07-jul	86,4	22,08	12,9	2,13	31	30

A55	01-aug	80,2	33,83	18,15	0,1	7880	7910
A56	02-aug	88,95	39,24	18,25	0,06	5810	5650
A57	06-aug	60,77	29,54	20,32	0,03	7030	7130
A71	01-aug	81,42	31,17	14,99	0,05	11800	11500
A72	02-aug	67,38	30,9	13,43	0,31	12100	13000
A73	06-aug	162,04	80,73	14,37	0,07	10600	10800
A87	01-aug	94,73	40,48	19,25	0,04	4230	4610
A88	02-aug	52,68	21,18	15,48	0,07	9690	9210
A89	06-aug	142,5	70,75	15,82	0,05	10500	11100
A63K	01-aug	93,49	39,58	19,89	0,25	3	16
A79K	01-aug	68,58	31,99	19,82	0,15	37	88
A95K	01-aug	142,19	56,8	13,49	0,43	39	99
A58	01-sep	21,94	17,88	15,71	0,43	12200	14000
A59	02-sep	16,57	12,39	9,62	0,46	14900	15600
A60	06-sep	44,73	36,9	21,5	0,81	6570	8180
A74	01-sep	43,67	35,31	19	0,99	6530	7060
A75	02-sep	14,01	11,37	8,93	0,57	9210	10700
A76	06-sep	27,07	21,88	17,65	1,04	6510	9830
A90	01-sep	29,4	24,54	18,57	1,27	6010	6730
A91	02-sep	34,5	25,74	18,21	1	7220	8210
A92	06-sep	52,03	43,11	21,28	0,8	4390	5540
A64K	01-sep	42,92	36,56	20,48	1,23	9	0
A80K	01-sep	14,88	12,43	9,98	0,64	0	0
A96K	01-sep	26,55	21,56	17,85	0,93	0	0

**Tabell B3** Vikter, LAI och aktivitet för raps.

Rutnr	Datum	Färskvikt [g]	Torrsvikt [g]	Burkviktt [g]	LAI	<sup>134</sup> Cs[Bq/kg]	<sup>85</sup> Sr [Bq/kg]
A97	22-jun	1,1	0,85	0,09	0,3	47299	54214
A98	23-jun	11,6	1,05	0,56	0,68	34525	47000
A99	27-jun	22,9	3,06	3,08	0,55	7817	11344
A113	22-jun	48,1	6,45	5,63	1,49	54900	63900
A114	23-jun	4,5	0,47	0,16	0,47	3591	12285
A115	27-jun	10,7	1,75	1,42	0,59	6445	9534
A129	22-jun	27,9	3,99	3,18	1,48	76400	91100
A130	23-jun	38,6	3,21	2,51	1,11	58300	68300
A131	27-jun	88,9	10,52	8,36	1,02	14000	14700
A109K	22-jun	0,8	0,76	0,2	0,29	0	0
A125K	22-jun	6,6	1,52	0,84	0,5	309	389
A141K	22-jun	30,8	4,05	3,38	0,7	1	1
A100	07-jul	170,7	16,37	13,29	3,02	25300	26200
A101	08-jul	65,9	6,88	6,04	3,43	73669	77192
A102	12-jul	37,7	4,72	3,97	1,84	24444	30495

A116	07-jul	55,3	5,72	5	1,71	24615	24876
A117	08-jul	106	31,28	13,22	5,44	15000	13400
A118	12-jul	143	19,1	15,49	2,09	6150	4860
A132	07-jul	215	19,85	15,49	2,3	22600	22500
A133	08-jul	118	13,39	12,21	3,14	30200	30300
A134	12-jul	181,9	27,01	13,65	3,69	11000	9400
A110K	07-jul	56,1	6,28	5,13	2,43	109	108
A126K	07-jul	46,2	5,1	4,44	3,46	305	580
A142K	07-jul	178,6	22,48	12,71	2,98	145	174
A103	01-aug	255,88	47,92	10,55	3,1	16400	17200
A104	02-aug	296,46	57,42	12,18	3,73	7990	8710
A105	06-aug	294,79	53,72	11,5	3,49	17700	19300
A119	01-aug	191,95	34,9	13,21	3,5	26700	27300
A120	02-aug	336,53	65,53	11,91	3,02	9340	9630
A121	06-aug	308,17	59,9	14,03	3,41	10200	10100
A135	01-aug	296,67	59,39	12,85	3,29	18100	19300
A136	02-aug	446,02	93,7	13,18	2,81	16300	16500
A137	06-aug	260,25	61,21	12,89	0,73	9340	9310
A111K	01-aug	396,15	75,08	13,16	3,42	66,10	16
A127K	01-aug	262,02	53,12	14,12	3,71	0	186
A143K	01-aug	236,63	49,18	15,26	2,5	45	10
A106	11-sep	113,87	43,3	16,5	0,69	6380	6370
A107	12-sep	132,69	46,4	15,05	0,85	3260	3620
A108	16-sep	277,97	90,87	16,57	0,83	5580	4390
A122	11-sep	184,63	58,62	17,24	0,84	7540	8100
A123	12-sep	126,7	38,54	14,81	0,86	6210	5820
A124	16-sep	93,67	39,79	13,36	0,66	4900	6300
A138	11-sep	197,46	82,62	12,39	0,77	9020	9730
A139	12-sep	156,03	50,63	13,87	0,92	4020	4600
A140	16-sep	109,27	45,93	13,89	0,73	3850	4450
A112K	11-sep	264,65	80,34	17,63	1,15	6	8
A128K	11-sep	119,65	42,61	15,48	0,76	49	121
A144K	11-sep	173,43	64,29	10,79	0,77	19	0

---

### BILAGA 3 Deponeringsvätskornas aktivitet

Deponeringsvätskan skulle innehålla 40kBq  $^{134}\text{Cs}$  och 40kBq  $^{85}\text{Sr}$ , dock är det omöjligt att vid beredning mäta upp exakta mängder stamlösning och vatten.

Deponeringsvätskornas aktivitet har därför mätts med HPGe-detektor. Dessutom har volymerna stamlösning och vatten, som använts vid beredning av deponeringsvätska, noterats och utifrån dessa värden har lösningarnas aktivitet beräknats. Värdena beräknades med hjälp av ekvation 1. De uppmätta och beräknade värdena har sedan jämförts, de skiljer sig inte åt nämnvärt och de ligger nära 40 kBq/L, se tabell B4. Vid beräkning av uppfångning och kvarhållning har de beräknade aktiviteterna använts.

**Tabell B4** Aktiviteter för deponeringsvätskorna uppmätt med HPGe-detektor och beräknade utifrån volymerna stamlösning och vatten.

Växt och dp	Datum	Uppmätt aktivitet $^{85}\text{Sr}$ [Bq/l]	Uppmätt aktivitet $^{134}\text{Cs}$ [Bq/l]	Beräknad aktivitet $^{134}\text{Cs}$ [Bq/l]	Beräknad aktivitet $^{85}\text{Sr}$ [Bq/l]
vall, dp1	26-maj	39500	40600	39750	40003
vall, dp2	16-jun	39800	40200	40140	40552
vete och raps, dp1	22-jun	39800	40000	39912	39530
vete och raps, dp2	07-jul	39900	40200	40460	40059
vete och raps, dp3	01-aug	42200	41900	39982	40049
vall, dp3	24-aug	40600	40600	40005	40194
vall och vete, dp4	01-sep	40400	41000	39516	40773
raps, dp4	11-sep	40100	40300	39958	40384

## BILAGA 4 Korrigering för fyllnadsgrad

När proverna maldes och placerades i burkar var det ibland inte tillräckligt med växtmaterial för att fylla hela burken, fyllnadsgraden har då uppskattats till 10, 25, 50 och 75 %. Aktiviteterna för dessa prover har sedan dividerats med en korrektionsfaktor. Korrektionsfaktorn varierar beroende på vilken detektor som har använts och därför finns här tre tabeller med korrektionsfaktorer, för detektor A, B och D. Fyllnadsgraden har plottats mot korrektionsfaktorerna för  $^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$  och en linje är anpassad till värdena. Ekvationen för denna linje har använts för att beräkna korrektionsfaktorerna för fyllnadsgraderna 10, 25, 50 och 75 %, se tabell B5, B6 och B7.

**Tabell B5** Korrektionsfaktorer för  $^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$  för detektor A.

	10 %	25 %	50 %	75 %
$^{134}\text{Cs}$	1,25	1,23	1,17	1,09
$^{85}\text{Sr}$	1,28	1,26	1,21	1,14

**Tabell B6** Korrektionsfaktorer för  $^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$  för detektor B.

	10 %	25 %	50 %	75 %
$^{134}\text{Cs}$	1,24	1,22	1,17	1,09
$^{85}\text{Sr}$	1,25	1,24	1,21	1,14

**Tabell B7** Korrektionsfaktorer för  $^{134}\text{Cs}$  och  $^{85}\text{Sr}$  för detektor D.

	10 %	25 %	50 %	75 %
$^{134}\text{Cs}$	1,37	1,35	1,28	1,15
$^{85}\text{Sr}$	1,4	1,37	1,29	1,19

Tabell B8 visar okorrigerade och korrigerade värden för de burkar som inte var fyllda till 100 %.

**Tabell B8** Okorrigerade och korrigerade värden för de burkar som inte var fyllda till 100 %.

Rutnr	Detektor	Fyllnadsgrad [%]	Korr.fakt. <sup>134</sup> Cs	Okorr. <sup>134</sup> Cs [Bq/kg]	<sup>134</sup> Cs[Bq/kg]	Korr.fakt. <sup>85</sup> Sr	Okorr. <sup>85</sup> Sr [Bq/kg]	<sup>85</sup> Sr [Bq/kg]
A3	B	50	1,17	5400	4615	1,21	5550	4587
A35	D	75	1,15	39000	33913	1,19	46500	39076
A97	D	10	1,37	64800	47299	1,4	75900	54214
A98	D	10	1,37	47300	34526	1,4	65800	47000
A99	D	75	1,15	8990	7817	1,19	13500	11344
A114	D	10	1,37	4920	3591	1,4	17200	12286
A115	D	50	1,28	8250	6445	1,29	12300	9535
A109	D	10	1,37	0	0	1,4	0	0
A125	D	50	1,28	395	308,59	1,29	502	389
A101	A	70	1,09	80300	73670	1,14	88000	77193
A102	A	50	1,17	28600	24444	1,21	36900	30496
A116	A	50	1,17	28800	24615	1,21	30100	24876
A110	A	60	1,17	128	109	1,21	131	108
A126	A	50	1,17	357	305	1,21	702	580

## BILAGA 5 Bearbetning av data – biomassa, aktivitet och uppfångning

Biomassa, aktivitet i Bq/m<sup>2</sup> och uppfångningsfraktionen för vall, vete och raps finns i tabell B9, B10 och B11. Efter mätning av aktiviteten med HPGe-detektor fås mätvärdena i Bq/kg, de har sedan räknats om till Bq/m<sup>2</sup>. Detta för att aktiviteten sedan ska kunna användas till att beräkna uppfångningsfraktionen. Uppfångningsfraktionen har beräknats med hjälp av ekvation 2. Även här saknas värden för försöksruta A34. Rutnummer markerad med K är kontrollrutor.

**Tabell B9** Biomassa, aktivitet och uppfångningsfraktion för vall.

Rutnr	Biomassa [kg/m <sup>2</sup> ]	<sup>134</sup> Cs[Bq/m <sup>2</sup> ]	<sup>85</sup> Sr [Bq/m <sup>2</sup> ]	f-Cs	f-Sr
A1	0,18	7251	7498	0,18	0,19
A2	0,74	15323	16960	0,38	0,43
A3	0,03	126	125	0,00	0,00
A17	0,20	3703	3983	0,09	0,10
A18	0,12	2924	2998	0,07	0,08
A19	0,38	9445	9178	0,23	0,23
A33	0,11	4286	4713	0,11	0,12
A34	-	-	-	-	-
A35	0,03	922	1063	0,02	0,03
A13K	0,51	41	72	0,00	0,00
A29K	0,11	4	4	0,00	0,00
A45K	0,12	6	24	0,00	0,00
A4	0,74	17370	18547	0,43	0,46
A5	0,59	21844	23840	0,54	0,59
A6	1,16	12347	13395	0,30	0,33
A20	0,69	21240	24412	0,52	0,61
A21	0,14	4378	4781	0,11	0,12
A22	0,46	13688	14430	0,34	0,36
A36	0,40	8145	10120	0,20	0,25
A37	0,48	7271	8316	0,18	0,21
A38	0,29	2331	2285	0,06	0,06
A14K	0,80	160,16	314	0,00	0,01
A30K	0,41	57	81	0,00	0,00
A46K	0,23	21	27	0,00	0,00
A7	0,03	1330	1320	0,03	0,03
A8	0,13	5163	5971	0,13	0,15
A9	0,11	2350	2415	0,06	0,06
A23	0,23	5906	6536	0,15	0,16
A24	0,26	6246	6758	0,16	0,17
A25	0,17	3842	4065	0,10	0,10
A39	0,15	4338	4644	0,11	0,12
A40	0,15	4201	4480	0,11	0,11
A41	0,27	6687	7299	0,17	0,18

A15K	0,08	8	11	0,00	0,00
A31K	0,15	26	38	0,00	0,00
A47K	0,21	19	25	0,00	0,00
A10	0,25	4507	6435	0,11	0,16
A11	0,28	4777	6994	0,12	0,18
A12	0,13	1919	2756	0,05	0,07
A26	0,12	1735	2554	0,04	0,07
A27	0,48	8611	11721	0,21	0,30
A28	0,27	2904	4369	0,07	0,11
A42	0,23	4966	6622	0,12	0,17
A43	0,17	3729	5001	0,09	0,13
A44	0,39	5092	8486	0,13	0,22
A16K	0,13	7	12	0,00	0,00
A32K	0,14	6	10	0,00	0,00
A48K	0,16	12	21	0,00	0,00

**Tabell B10** Biomassa, aktivitet och uppfångningsfraktion för vete.

Rutnr	Biomassa [kg/m2]	<sup>85</sup> Sr		f-Cs	f-Sr
		<sup>134</sup> Cs[Bq/m2]	[Bq/m2]		
A49	0,03	206	276	0,01	0,01
A50	0,02	53	82	0,00	0,00
A51	0,09	132	179	0,00	0,00
A65	0,03	492	590	0,01	0,02
A66	0,04	0	0	0,00	0,00
A67	0,08	125	148	0,00	0,00
A81	0,04	529	644	0,01	0,02
A82	0,03	171	249	0,00	0,01
A83	0,05	77	115	0,00	0,00
A61K	0,02	0	0	0,00	0,00
A77K	0,02	11	14	0,00	0,00
A93K	0,02	11	14	0,00	0,00
A52	0,23	2454	2338	0,06	0,06
A53	0,25	2433	2448	0,06	0,06
A54	0,19	859	890	0,02	0,02
A68	0,32	4594	4403	0,12	0,11
A69	0,21	2407	2449	0,06	0,06
A70	0,15	1818	1910	0,05	0,05
A84	0,24	1848	1872	0,05	0,05
A85	0,29	3311	3197	0,08	0,08
A86	0,30	1793	1724	0,05	0,04
A62K	0,07	2	6	0,00	0,00
A78K	0,25	9	16	0,00	0,00
A94K	0,35	11	11	0,00	0,00



A55	0,54	4265	4282	0,11	0,11
A56	0,63	3648	3547	0,09	0,09
A57	0,47	3323	3370	0,08	0,08
A71	0,50	5885	5735	0,15	0,14
A72	0,49	5982	6427	0,15	0,16
A73	1,29	13692	13950	0,34	0,35
A87	0,65	2740	2986	0,07	0,08
A88	0,34	3284	3121	0,08	0,08
A89	1,13	11886	12565	0,30	0,31
A63K	0,63	2	10	0,00	0,00
A79K	0,51	19	45	0,00	0,00
A95K	0,91	35	90	0,00	0,00
A58	0,29	3490	4005	0,08	0,10
A59	0,20	2954	3093	0,07	0,08
A60	0,59	3879	4829	0,10	0,12
A74	0,56	3689	3989	0,09	0,10
A75	0,18	1675	1947	0,04	0,05
A76	0,35	2279	3441	0,06	0,09
A90	0,39	2360	2642	0,06	0,07
A91	0,41	2973	3381	0,07	0,09
A92	0,69	3028	3821	0,07	0,10
A64K	0,58	5	0	0,00	0,00
A80K	0,20	0	0	0,00	0,00
A96K	0,34	0	0	0,00	0,00

**Tabell B11** Biomassa, aktivitet och uppfångningsfraktion för raps.

Rutnr	Biomassa [kg/m <sup>2</sup> ]	<sup>85</sup> Sr		f-Cs	f-Sr
		<sup>134</sup> Cs[Bq/m <sup>2</sup> ]	[Bq/m <sup>2</sup> ]		
A97	0,01	643	737	0,02	0,02
A98	0,02	580	790	0,02	0,02
A99	0,05	383	555	0,01	0,01
A113	0,10	5666	6594	0,14	0,17
A114	0,01	27	92	0,00	0,00
A115	0,03	180	267	0,01	0,01
A129	0,06	4877	5816	0,12	0,15
A130	0,05	2994	3508	0,08	0,09
A131	0,17	2356	2474	0,06	0,06
A109K	0,01	0	0	0,00	0,00
A125K	0,02	8	9	0,00	0,00
A141K	0,06	0	0	0,00	0,00
A100	0,26	6627	6862	0,17	0,17
A101	0,11	8110	8497	0,20	0,21

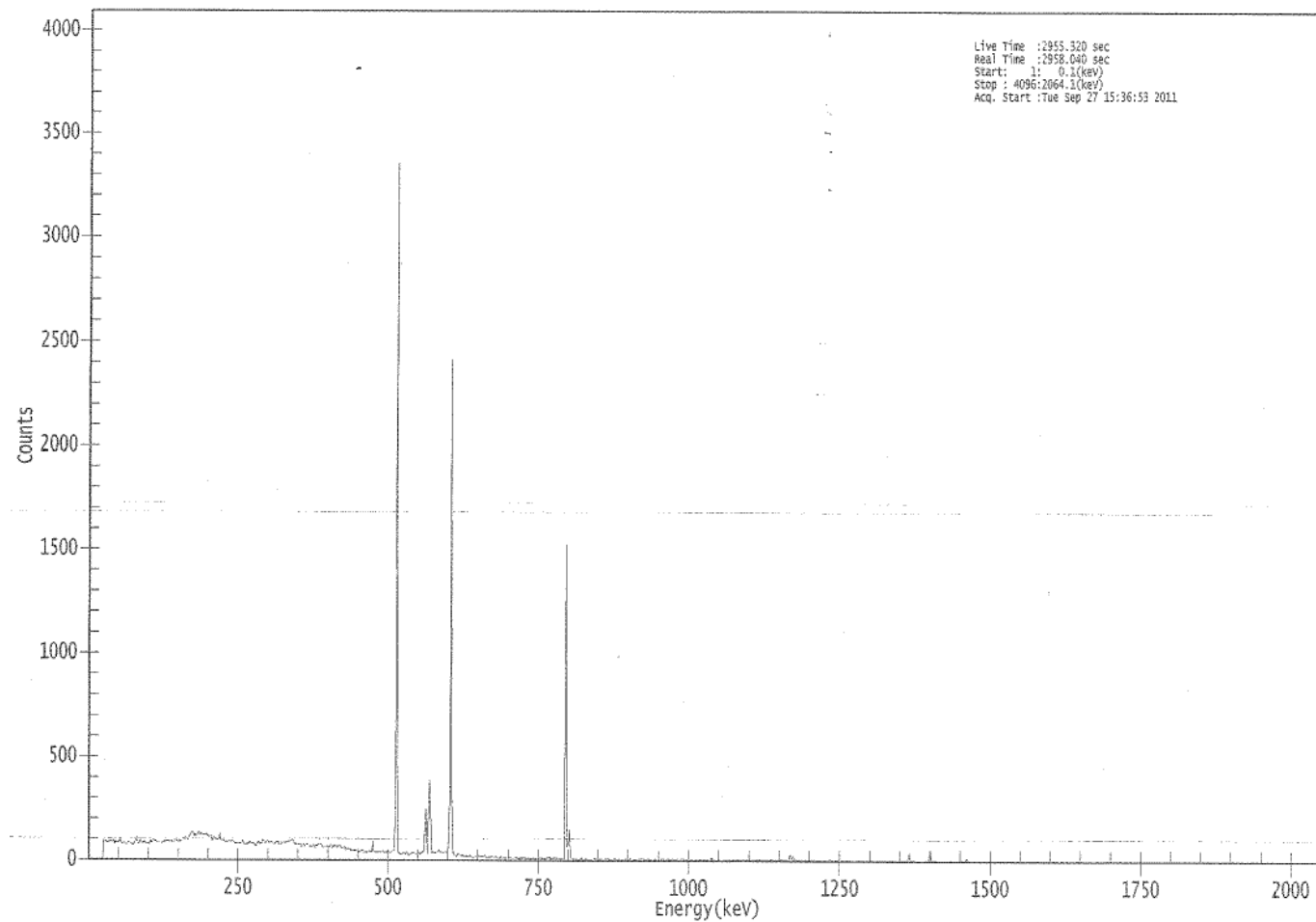
A102	0,08	1846	2303	0,05	0,06
A116	0,09	2253	2277	0,06	0,06
A117	0,50	7507	6706	0,19	0,17
A118	0,31	1879	1485	0,05	0,04
A132	0,32	7178	7146	0,18	0,18
A133	0,21	6470	6491	0,16	0,16
A134	0,43	4754	4062	0,12	0,10
A110K	0,10	11	11	0,00	0,00
A126K	0,08	25	47	0,00	0,00
A142K	0,36	52	63	0,00	0,00

A103	0,77	12574	13188	0,31	0,33
A104	0,92	7341	8002	0,18	0,20
A105	0,86	15214	16589	0,38	0,42
A119	0,56	14909	15244	0,37	0,38
A120	1,05	9793	10097	0,25	0,25
A121	0,96	9776	9680	0,24	0,24
A135	0,95	17199	18340	0,43	0,46
A136	1,50	24437	24737	0,61	0,62
A137	0,98	9147	9118	0,23	0,23
A111K	1,20	79	189	0,00	0,00
A127K	0,85	0	158	0,00	0,00
A143K	0,79	35	8	0,00	0,00

A106	0,69	4420	4413	0,11	0,11
A107	0,74	2420	2687	0,06	0,07
A108	1,45	8113	6383	0,20	0,16
A122	0,94	7072	7597	0,18	0,19
A123	0,62	3829	3589	0,10	0,09
A124	0,64	3120	4011	0,08	0,10
A138	1,32	11924	12862	0,30	0,32
A139	0,81	3257	3726	0,08	0,09
A140	0,73	2829	3270	0,07	0,08
A112K	1,29	8	11	0,00	0,00
A128K	0,68	33	82	0,00	0,00
A144K	1,03	19	0	0,00	0

---

## BILAGA 6 Spektrum från mätning av radioaktiviteten



**Figur B2** Spektrum från mätning av radioaktiviteten för prov A138, energi [keV] på x-axeln och counts [sekunder] på y-axeln.  $^{134}\text{Cs}$  har sina två mest förekommande toppar vid 604,69 keV och 795,84 keV och  $^{85}\text{Sr}$  har sin topp vid 513,99 keV.